

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E NATURALI
Corso di laurea magistrale in
SCIENZE PER L'AMBIENTE

QUALITÀ BIOLOGICA DEI SUOLI
DELLA PINETA DI SAN VITALE (RA)

Tesi di laurea in: QUALITÀ DEL SUOLO

Relatore:

Dott. Alessandro Buscaroli

Presentata da:

Laura Paladin

Correlatori:

Dott. Andrea Pasteris

Dott.ssa Silvia Bacchi

III Sessione

Anno Accademico 2009/2010

Indice

1. Introduzione	1
1.1 Caratteristiche e importanza del suolo	1
1.2 Il problema della salinizzazione	3
1.3 Uso di strumenti biologici per definire la qualità ambientale del suolo	9
1.3.1 Ecotossicologia	9
1.3.1.1 Determinazioni sulla matrice liquida	9
1.3.1.2 Determinazioni sulla matrice solida	10
1.3.2 Indici di qualità ambientale	12
1.3.2.1 Indici di qualità ambientale con i nematodi	12
1.3.2.2 Indici di qualità ambientale basati sulla mesofauna	14
1.4 I Microartropodi	15
2. Obiettivi	20
3. Descrizione dell'area di studio	21
3.1 Inquadramento geografico	21
3.2 Origine della zona d'interesse	25
3.3 Gli interventi antropici	27
3.4 Origini storiche della pineta	30
3.5 Il problema della salinizzazione	31
3.6 Inquadramento pedologico	36
3.7 Gli habitat della pineta	41
3.8 La pedofauna	44
4. Materiali e metodi	46
4.1 Disegno di campionamento	46
4.1.1 Base dati	46
4.1.2 Individuazione dei siti di campionamento	46
4.1.3 Periodi di campionamento	51
4.2 Modalità di raccolta dei campioni	52

4.2.1 Campionamento degli invertebrati del suolo	52
4.2.2 Campionamento per le analisi chimiche	53
4.3 Riconoscimento delle forme di humus	56
4.4 Trattamento dei campioni	58
4.4.1 Trattamento dei campioni per l'estrazione degli invertebrati e per l'applicazione del metodo QBS-ar	58
4.4.2 Trattamento preliminare dei campioni per le analisi chimiche	60
4.5 Riconoscimento degli invertebrati al microscopio	60
4.6 Determinazione della CE e del pH	61
4.7 Calcolo del QBS-ar	62
4.8 Individuazione delle classi di qualità del suolo	67
4.9 Analisi statistica dei dati	68
4.9.1 Dati utilizzati	68
4.9.2 Misure di distanza	69
4.9.3 Analisi delle Componenti Principali (PCA)	71
4.9.4 Analisi delle Coordinate Principali (PCO)	73
4.9.5 Analisi multivariata della varianza per permutazioni (PERMANOVA)	74
4.9.6 Procedura BIOENV	77
4.9.7 <i>Bubble plots</i> (grafici a bolle)	78
5. Risultati	79
5.1 Le caratteristiche chimiche e fisiche dei suoli	79
5.1.1 CE, pH e contenuto d'acqua	79
5.1.2 Caratteristiche chimiche e fisiche del suolo valutate sui campioni B	84
5.1.3 Le forme di humus valutate sui campioni B	88
5.2 La pedofauna	93
5.2.1 Composizione del popolamento, valori dell'indice QBS-ar e classi di qualità del suolo	93
5.2.2 Analisi multivariata della struttura del popolamento	102
5.3 Relazione tra caratteristiche chimico-fisiche e struttura del popolamento	109
5.4 Relazione tra le forme di humus e la struttura del popolamento	113
6. Discussione	115

7. Conclusioni	122
Bibliografia	124

1. Introduzione

1.1 Caratteristiche e importanza del suolo

I suoli sono corpi naturali corrispondenti allo strato superficiale della crosta terrestre, costituenti il supporto della vita vegetale e animale e pertanto una risorsa naturale fondamentale.

Si possono considerare tre fasi costituenti il suolo: solida, liquida e gassosa.

La fase solida comprende una parte organica, derivante dalla decomposizione di organismi vegetali e animali o di loro parti, ed una inorganica, formata da frammenti di roccia, granuli minerali e dai prodotti derivanti dall'alterazione degli stessi.

La fase liquida è associata all'acqua presente nel suolo più o meno da esso trattenuta.

Infine, la fase gassosa è rappresentata dall'aria con i vari gas quali ossigeno, anidride carbonica e azoto (Giordano, 1999).

Secondo quanto affermato da Dokuchaev (1898), poi formalizzato da Jenny (1941), alla formazione del suolo concorrono diversi fattori pedogenetici tra loro interagenti che sono: il clima, gli organismi vegetali e animali compreso l'uomo, il materiale derivante dalla roccia madre (materiale incoerente sovrastante la roccia non alterata), la topografia e il tempo. A questi, possono aggiungersi fattori di importanza locale, quali ad esempio la saturazione idrica o la salinizzazione.

Il risultato dell'azione combinata dei fattori della pedogenesi porta alla formazione di strati di suolo aventi caratteri fisici e chimici diversi tra loro, chiamati orizzonti.

In base a quanto espresso dalla Soil Survey Division Staff (1993), un orizzonte è uno strato, più o meno parallelo alla superficie del suolo, risultante dai processi di formazione del suolo, distinguibile dagli strati adiacenti per delle proprietà caratteristiche.

Sempre secondo la Soil Survey Division Staff (1993), i principali orizzonti dei suoli sono:

- orizzonti O (organici), nei quali la componente principale risulta essere il materiale organico, come ad esempio lettiera decomposta o parzialmente decomposta;
- orizzonti A (organo-minerali), formati alla superficie e sotto un orizzonte O e caratterizzati da sostanza organica umificata frammista alla componente minerale;
- orizzonti E (eluviali), presenti vicino alla superficie, al di sotto di un orizzonte O, questi orizzonti hanno subito la perdita di sostanze in soluzione o sospensione e ne risultano perciò impoverite;

- orizzonti B (illuviali), formati sotto agli orizzonti A, E o O e caratterizzati dall'accumulo di sostanze provenienti dagli orizzonti superiori;
- orizzonti C, riconducibili principalmente a strati minerali, incoerenti, poco influenzati dai processi che coinvolgono gli orizzonti O, A, E o B e perciò mancanti delle proprietà degli stessi;
- orizzonti R, costituenti la roccia madre inalterata e coerente;
- orizzonti di transizione, che si trovano tra due differenti orizzonti quando quest'ultimi non hanno una separazione netta, o le proprietà dell'orizzonte sovrastante e di quello sottostante sono sovrapposte, oppure parti di un orizzonte sono incluse in un altro.

Il suolo è una risorsa non rinnovabile, che soddisfa molte funzioni vitali di importanza socio-economica ed ambientale. Il suolo ha un ruolo come habitat e pool genetico; funge da basamento per le attività antropiche, il paesaggio e il patrimonio storico e fornisce molte materie prime.

Pertanto, il suolo è sottoposto a molte pressioni essendo alla base di una gamma di beni e servizi essenziali che garantiscono e regolano la vita sul pianeta (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Questo complesso sistema biogeochimico è non solo un mezzo di supporto per la produzione agricola e forestale, ma soprattutto un componente critico di un insieme diversificato di eco-processi relativi al ciclo dell'acqua, ai flussi di carbonio organico, alla produzione e immagazzinamento di gas ad effetto serra, al ciclo dei nutrienti. Così, come riportato dal *"The European Environment State and Outlook 2010"* (Jones A. *et al.*, 2010) in riferimento al comparto suolo, il nostro benessere e la nostra economia dipendono da un moltitudine di funzioni del suolo:

- il suolo è il mezzo che ci permette di produrre il cibo, per noi esseri umani e per gli animali, le fibre naturali, il legname e sostiene la fauna selvatica. Circa il 99% della fornitura globale di cibo per il consumo umano proviene dalla produzione basata sull'agricoltura (FAO, 2007);
- il suolo è un filtro naturale che neutralizza alcuni inquinanti trasformandoli o accumulando e assorbendo la loro tossicità. Inoltre, i suoli sono un fattore importante nella purificazione dell'acqua ed una componente fondamentale per la regolazione delle inondazioni attraverso l'accumulo dell'acqua piovana. L'impermeabilizzazione e la compattazione dei suoli comportano un più rapido afflusso di acqua piovana alla rete fluviale;

- il suolo è un reattore biologico dove resti vegetali e animali e altri scarti organici sono decomposti per fornire nutrienti che sostengono la vita, tramite processi di decomposizione guidati da una grande quantità di microrganismi come batteri (la maggior parte), funghi, protozoi, nematodi, insetti, ragni, vermi, e apparati radicali. Questo biota è coinvolto nella maggior parte delle funzioni più importanti del suolo: guida i processi fondamentali del ciclo dei nutrienti, regola le comunità vegetali, influenza la degradazione delle sostanze inquinanti e contribuisce alla stabilizzazione della struttura del suolo. Gli organismi del suolo rappresentano anche una fondamentale risorsa biotecnologica, ad esempio, molte specie di batteri e attinomiceti possono essere fonti di antibiotici e altri farmaci;
- il suolo svolge un ruolo cruciale nel regolare una serie di cicli biologici e chimici a sostegno della vita naturale (azione ecosistemica). Carbonio, azoto e altri nutrienti essenziali vengono continuamente riciclati nel ciclo che coinvolge il suolo, le piante, i depositi geologici, l'acqua e l'atmosfera. L'intensità di questi scambi biogeochimici varia da luogo a luogo ed è regolata dalle specifiche caratteristiche del suolo;
- il suolo costituisce la base su cui costruire gli edifici, le strade e altre infrastrutture. Oltre a fornire il supporto fisico per la maggior parte delle infrastrutture umane, il suolo fornisce anche una gamma di materie prime come argilla per la ceramica e torba per la produzione di combustibile;
- il suolo conserva il patrimonio storico e archeologico sepolto, preservandolo da danni e impoverimento. Il grado di conservazione dipende dalle caratteristiche del suolo e dalle condizioni locali.

1.2 Il problema della salinizzazione

I sali sono sostanze naturalmente presenti nei suoli e nell'acqua. I suoli che presentano un problema di salinizzazione sono caratterizzati da una presenza eccessiva di sali (o ioni derivanti da questi) che possono provocare la formazione di suoli salini o suoli sodici.

I suoli salini derivano dall'accumulo di sali, comunemente rappresentati da cloruri, solfati, carbonati e bicarbonati di sodio, potassio, magnesio, calcio, che determinano un aumento eccessivo degli ioni, ad essi associati, nella soluzione circolante presente all'interno del suolo (SoCo Project Team, 2009).

Secondo il World Reference Base for Soil Resources (FAO, ISRIC e ISSS, 1998), i suoli salini sono classificati come *Solonchaks* e la loro identificazione avviene in base alla

presenza dell'orizzonte “salico”, un orizzonte superficiale o sub-superficiale arricchito in sali solubili, nei primi 50 cm di profondità.

La valutazione della salinità del suolo viene effettuata sulla base della misura della conduttività elettrica (CE) dell'estratto in pasta satura, o di sospensioni suolo-acqua in diverso rapporto (1:2,5 o 1:5). Esiste infatti una stretta relazione tra contenuto salino e capacità del mezzo di trasmettere elettricità. Viene definito salino un suolo che presenti CE in pasta satura > 4 dS/m a 25°C (USDA, 1954).

Più in dettaglio, è possibile procedere ad una ulteriore suddivisione dei livelli di salinità, anche in relazione alla diversa modalità di determinazione analitica, come mostrato in Tab. 1.1 (Sbaraglia & Lucci, 1994; RER, 1994).

Tab. 1.1. Classi di salinità del suolo (individuate da Sbaraglia e Lucci, 1994 e RER, 1994).

CE pasta satura (dS/m)	CE (1:2,5) (dS/m)	Valutazione
0 - 2	0 – 0,5	Non salino
2 – 4	0,6 – 1	Leggermente salino
4 – 8	1,1 – 2	Moderatamente salino
8 – 16	2,1 – 4	Molto salino
> 16	> 4	Estremamente salino

I suoli sodici invece, sono caratterizzati da una elevata concentrazione di ioni sodio (Na^+) nelle fasi solida o liquida. Il sodio può cristallizzare formando le “efflorescenze” di carbonato acido di sodio (NaHCO_3) o carbonato di sodio (Na_2CO_3) a livello della superficie del suolo o della superficie degli elementi strutturali presenti al suo interno, oppure può rimanere in soluzione in forma ionica comportando l'alcalinizzazione del suolo, o ancora può essere adsorbito, sempre in forma ionica, a livello di argille e/o carbonati divenendo parte del complesso di scambio cationico (CSC) (SoCo Project Team, 2009).

In base al WRB (FAO, ISRIC e ISSS, 1998), i suoli che presentano caratteri alcalini sono definiti *Solonetz*. Per essere definiti in tal modo devono presentare un orizzonte detto “sodico” nei primi 100 cm dalla superficie del suolo. L'orizzonte “sodico” è un orizzonte sub-superficiale che presenta un'elevata densità, alto contenuto in argilla (maggiore rispetto agli orizzonti superiori) e una elevata concentrazione di ioni sodio e/o magnesio.

I suoli *Solonetz* e anche i suoli che presentano delle proprietà “sodiche”, sono caratterizzati da una elevata alcalinità. Vi sono poi i suoli “Iposodici” che presentano un'alcalinità media.

Le caratteristiche dei suoli *Solonetz* possono essere usate anche per caratterizzare la presenza di un orizzonte con proprietà “sodiche”, per il quale si individuano tre differenti classi di alcalinità:

- bassa, $ESP < 6 \%$
- media, $6 < ESP < 15 \%$
- alta, $ESP > 15 \%$

(ESP, Exchangeable Sodium Percentage, è la percentuale di sodio scambiabile).

Per i suoli salini si possono distinguere due forme di salinizzazione: primaria e secondaria. La salinizzazione primaria riguarda un accumulo di sali nel suolo dovuto a processi naturali quali: rilascio di elevate concentrazioni di sali dal materiale parentale all’acqua di falda e quindi al suolo in seguito a movimenti di trasgressione o regressione in particolari condizioni geologiche, risalita di acqua arricchita in sali dalla falda verso la superficie o verso gli orizzonti superficiali in particolari situazioni (ad esempio elevata evapotraspirazione estiva), intrusione salina nella falda in regioni a quote inferiori al livello marino, microdepressioni caratterizzate dall’assenza o da scarso drenaggio, inondazioni di acque ricche in sali provenienti da aree caratterizzate da substrati geologici che rilasciano elevate concentrazioni di sali, azione dell’aerosol marino con deposito di sali sulla superficie del suolo nelle regioni costiere (Várallyay, 2006).

La salinizzazione secondaria è dovuta invece all’azione antropica che si può esplicitare in: irrigazione con acqua ricca in sali, innalzamento del livello piezometrico (per filtrazione da canali non confinati, irrigazione scarsa o irregolare, scarso drenaggio), uso di fertilizzanti e/o ammendanti soprattutto in zone destinate ad una attività agricola di tipo intensivo, pianeggianti, con scarsa permeabilità e filtrazione, contaminazione del suolo con acque ricche in sali e in prodotti derivanti da processi industriali (Várallyay, 2006).

Le conseguenze negative associate al problema della salinizzazione sono molteplici e riferibili principalmente alla biosfera e alla pedosfera. Il principale effetto associato ad un aumento della salinità è l’incremento del potenziale osmotico dell’acqua contenuta nel suolo che provoca stress idrico per le piante, che non riescono più ad assorbire l’acqua dal suolo.

Inoltre, la salinizzazione aumenta l’impermeabilità degli strati profondi del suolo, impedendone, di fatto, l’uso per la coltivazione (Van-Camp *et al.*, 2004).

Per il caso specifico del sodio, oltre a determinare lo sbilanciamento del rapporto tra ioni mono e polivalenti, è compromessa la struttura del suolo. In alcuni casi si ha la totale e irreversibile destrutturazione del suolo che non può più ospitare specie vegetali per fini

agricoli o appartenenti alla vegetazione naturale potenzialmente presente, comportando anche un'alterazione dello specifico sistema idrologico.

Anche la composizione specifica dei sali può avere degli effetti significativi sulla salute delle piante: una composizione sbilanciata può determinare degli effetti tossici o inibire l'assorbimento di nutrienti o elementi essenziali. Inoltre, gli ioni derivanti dai sali possono comportare una variazione della reazione del suolo (pH) con conseguenti cambiamenti del chimismo degli ioni in soluzione e dunque possibili effetti tossici per le piante o deficit di nutrienti (Bloem *et al.*, 2008).

I suoli alcalini, non permettendo la crescita delle piante a causa del pH elevato, hanno la caratteristica di essere facilmente erodibili dall'acqua e dal vento (Van-Camp *et al.*, 2004).

Tali conseguenze hanno a loro volta delle ripercussioni a più ampia scala a livello di: biodiversità, causando la compromissione della vita e delle funzioni delle biocenosi presenti nel suolo; funzioni specifiche del suolo (aumento del potenziale di erosione e desertificazione, riduzione della struttura del suolo, distruzione degli aggregati, compattazione); ciclo idrologico (variazioni sul regime di umidità del suolo, aumento del pericolo, della frequenza, della durata e dell'intensità di fenomeni estremi quali ad esempio allagamenti o viceversa situazioni di siccità); ciclo biogeochimico in relazione ad alterazioni dei composti assorbiti dalle piante come nutrimento, possibili effetti sinergici con inquinanti presenti nel suolo e potenziale formazione di composti o singoli elementi pericolosi (Huber *et al.*, 2008).

I tipi di suolo colpiti dal problema della salinizzazione si differenziano sia per le caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche, sia nella loro distribuzione geografica.

Secondo quanto espresso nel Report del progetto “*Sustainable Agriculture and Soil Conservation*” (SoCo Project Team, 2009), i principali fattori naturali che influenzano la salinità del suolo sono: il clima, il materiale parentale, la copertura vegetale e/o i singoli tipi di vegetazione, la topografia e le specifiche caratteristiche del suolo.

A livello antropico, i più importanti fattori influenti sono: il tipo di utilizzo del suolo, il tipo di gestione del territorio e il livello di degrado del territorio.

Dal punto di vista geografico, il problema della salinizzazione del suolo riguarda ampie zone di tutti i continenti della Terra. Salinizzazione, alcalinizzazione e sodicizzazione sono, a livello mondiale, tra i più importanti e più diffusi processi di degradazione del suolo, nonché tra i principali agenti stressanti ambientali ed ecologici della biosfera. Rappresentano dunque un limite al potenziale agro-ecologico del suolo ed un rischio ecologico e socio-economico per lo sviluppo sostenibile (Jones *et al.*, 2010). In particolare,

si stima che tale problema sia la maggiore causa di desertificazione dei suoli (Van-Camp *et al.*, 2004).

Secondo recenti stime, a livello globale, la superficie affetta da tali fenomeni si aggira intorno ad un miliardo di ettari. Le zone più colpite sono le regioni aride e semiaride dell'Asia, Australia e Sud America (Huber *et al.*, 2008).

Come si può osservare nella Fig. 1.1, in Europa il problema della salinizzazione colpisce una superficie pari a circa 3.8 milioni di ettari (EEA, 1995) e riguarda sia territori caratterizzati naturalmente da suoli salini come Spagna, Ungheria, Grecia e Bulgaria, sia territori salinizzati attraverso l'azione antropica. Tra questi troviamo alcune zone in Italia, Portogallo, Francia e Slovacchia e la Valle dell'Ebro in Spagna (Jones *et al.*, 2010). In generale comunque, le regioni più colpite sono quelle affacciate sul Mediterraneo (Van-Camp *et al.*, 2004).

Considerando poi gli attuali cambiamenti climatici, con l'aumento della temperatura e la riduzione delle precipitazioni, si sta osservando un peggioramento della situazione (Van-Camp *et al.*, 2004) e il trend futuro si prospetta in aumento per molti stati come ad esempio Spagna, Grecia, e Ungheria (De Paz *et al.*, 2004), sebbene non si abbiano dati sistematici per tutta l'Europa (Jones *et al.*, 2010).

A livello italiano, il fenomeno interessa in particolare alcune regioni dell'Italia meridionale e insulare (Sicilia, Sardegna, Puglia), ma anche settentrionale (Emilia Romagna, Veneto e Friuli), anche se non esiste una cartografia di dettaglio dei suoli italiani affetti da salinità (Fierotti *et al.*, 1999).

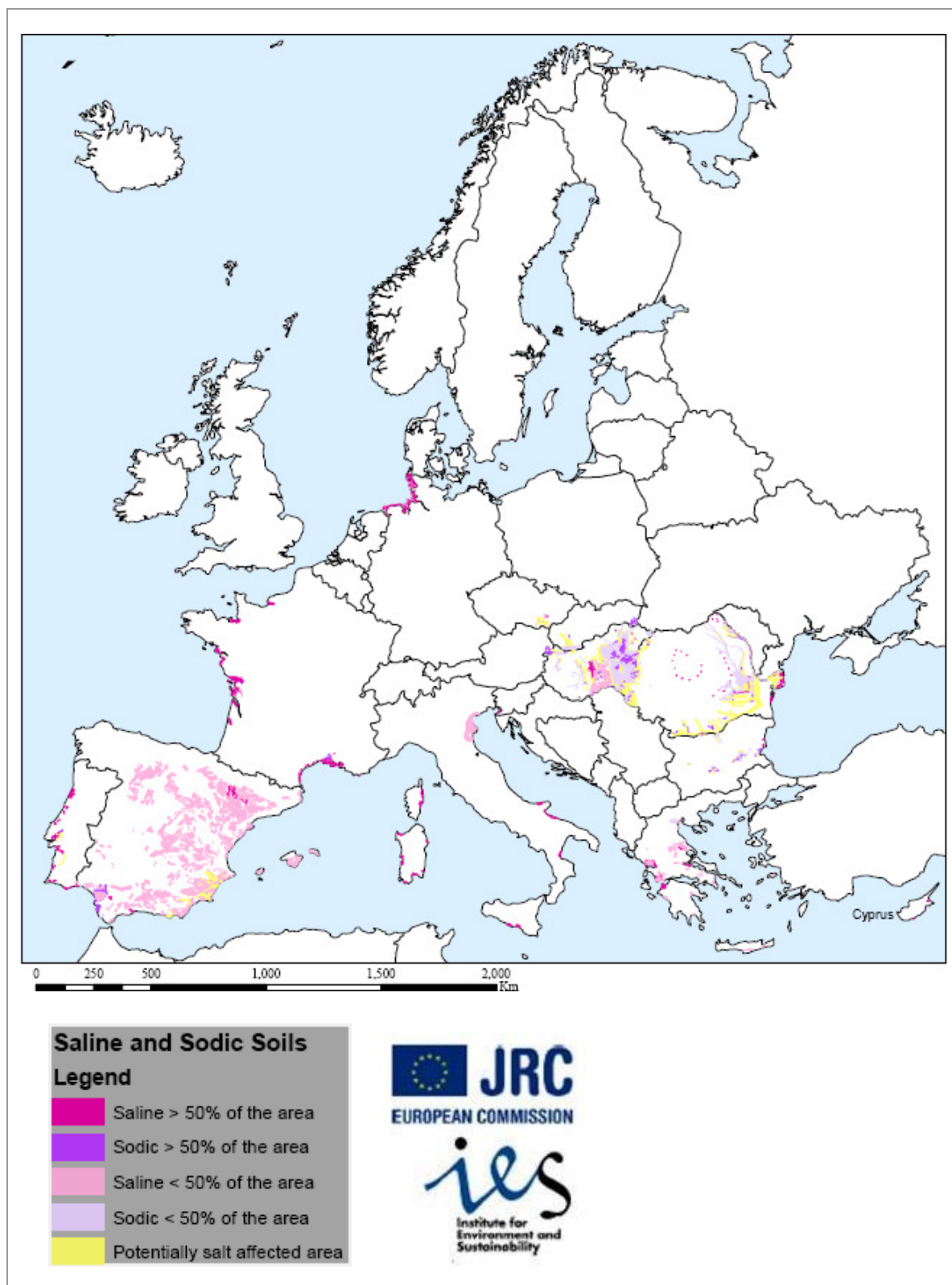


Fig.1.1. Carta della distribuzione dei suoli salini e dei suoli sodici nell'Unione Europea (Tóth *et al.*, 2008).

1.3 Uso di strumenti biologici per definire la qualità ambientale del suolo

Lo sviluppo di metodi biologici applicativi per la valutazione della qualità ambientale del suolo è attività di ricerca relativamente recente. Soltanto negli ultimi anni, infatti, si è sancita con studi a livello mondiale l'importanza della biodiversità nell'ecologia dell'ecosistema suolo e, soltanto a metà degli anni '90, ricercatori a livello internazionale hanno proposto una caratterizzazione dei suoli basata sul biomonitoraggio (APAT, 2002).

Infatti, la caratterizzazione chimica del suolo non consente, da sola, di esprimere valutazioni relative al pericolo per gli organismi viventi; è necessario pertanto ricorrere agli strumenti biologici ed ecotossicologici per una valutazione complessiva.

Il biomonitoraggio è rivolto alla valutazione della qualità del suolo mediante l'utilizzo di organismi viventi. Questi ultimi possono essere utilizzati in laboratorio nelle prove di tossicità oppure osservati nel loro ambiente naturale e rappresentare indicatori delle condizioni ambientali.

1.3.1 Ecotossicologia

L'ecotossicologia è la scienza che, utilizzando metodi e concetti propri della tossicologia, applica i principi dell'ecologia e della chimica ambientale allo studio degli effetti delle sostanze tossiche sugli ecosistemi. Inizialmente l'impiego di test biologici era rivolto unicamente alla definizione di ciò che era accaduto in passato, attualmente la prospettiva nella quale si inseriscono i test biologici include l'approccio predittivo, utilizzando le analisi come strumento previsionale per la valutazione del rischio ambientale (APAT, 2002).

Un saggio ecotossicologico è una prova che utilizza un sistema biologico come bersaglio. Essa richiede che un organismo vivente sia posto a contatto per un determinato tempo ad una sostanza in esame e che si valuti la risposta mostrata dall'organismo (Maffiotti *et al.*, 1997).

Le determinazioni per valutare la tossicità dei suoli possono essere condotte sia direttamente sulla matrice solida sia su campioni di estratto acquoso.

1.3.1.1 Determinazioni sulla matrice liquida

L'utilizzo dell'elutriato nasce da varie considerazioni, come l'importanza della fase acquosa all'interno della matrice suolo nella produzione dell'effetto tossico e quale sistema di trasporto delle sostanze tossiche da e verso altri comparti ambientali.

Le prove di tossicità su elutriato, ottenuto dal campione in esame, sono prevalentemente rivolte a evidenziare la presenza e la biodisponibilità di contaminanti inorganici e microinquinanti metallici idrosolubili.

In base a quanto riportato dalla guida tecnica sui metodi di analisi per il suolo e i siti contaminati, con particolare riferimento agli indicatori ecotossicologici e biologici, redatto da APAT (2002), le principali prove di tossicità sulla matrice liquida sono:

- prova di tossicità con *Vibrio fischeri*, mediante la quale viene valutata la tossicità acuta di un campione acquoso, tal quale o diluito, verificando tramite luminometro l'inibizione della bioluminescenza naturalmente emessa da una popolazione monospecifica di cellule di batteri Gram-negativi appartenenti alla specie *Vibrio fischeri*, dopo un tempo di contatto di 15 minuti con il campione in esame, tal quale o diluito. I risultati possono essere espressi come inibizione percentuale (I%) e/o come concentrazione efficace ad indurre un'inibizione della bioluminescenza pari al 50% (EC₅₀);
- prova di tossicità con *Daphnia magna*, determinando l'inibizione della mobilità della *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea). Viene valutata la concentrazione del campione che immobilizza il 50% degli organismi testati dopo 24 ore ed eventualmente dopo 48 ore (EC₅₀ 24 h; EC₅₀ 48 h);
- Prova di tossicità con *Pseudokirchneriella subcapitata* (*Selenastrum capricornutum*), che permette di evidenziare l'effetto tossico cronico mediante l'inibizione di crescita della specie *Selenastrum capricornutum* Printz, recentemente rinominata *Pseudokirchneriella subcapitata*, un'alga verde monocellulare (Chlorophyceae) appartenente all'ordine Chlorococcales, rispetto ad un controllo (UNI EN, 1993).

1.3.1.2 Determinazioni sulla matrice solida

Le prove di tossicità condotte direttamente sulla matrice solida hanno il vantaggio di utilizzare la matrice in toto e non solo l'estratto acquoso, avvicinandosi in tal modo maggiormente alla situazione reale. Tuttavia, esse risentono delle interazioni tra il suolo e la componente tossica, interazioni che esercitano effetti non trascurabili sulla biodisponibilità delle sostanze tossiche.

Per valutare la qualità dei suoli con questo tipo di saggi si possono utilizzare come specie bersaglio sia i vegetali che gli animali.

I test di tossicità su piante sono generalmente metodi veloci che richiedono un impegno economico molto contenuto, offrendo la possibilità di evidenziare l'effetto contemporaneo di più agenti inquinanti, come spesso accade in una reale situazione di inquinamento. Le piante utilizzate per questi tipi di saggi sono definite piante indicatrici in quanto rispondono con sintomi evidenti all'azione di uno o più inquinanti. Esse devono possedere una bassa selettività all'assorbimento di sostanze tossiche e non devono essere accumulatrici degli inquinanti nei propri tessuti, perché altrimenti non potrebbero essere utilizzate per un saggio diretto e veloce, ma si dovrebbe effettuare l'analisi chimica dei loro organi (APAT, 2002).

Sempre secondo quanto riportato dalla guida tecnica dell'APAT (2002), alcuni dei metodi più comunemente utilizzati come test di tossicità su piante sono:

- metodo per la misura dell'inibizione della crescita radicale, si basa sulla stima della crescita radicale di semi fatti germinare in condizioni controllate. Dopo il periodo di crescita viene misurata la lunghezza radicale delle piante cresciute sul suolo oggetto del saggio in riferimento ad un controllo. Il metodo dà risultati positivi se viene determinata una differenza statisticamente significativa tra le lunghezze radicali delle piantine appartenenti alle diverse tesi (ISO 11269 parte I, 1993).
- Test di germinazione e allungamento radicale, basato sulla determinazione dell'inibizione della germinazione e allungamento radicale in due dicotiledoni, *Cucumis sativus* (Cetriolo) e *Lepidium sativum* (Crescione), e una monocotiledone, *Sorghum saccharatum* (Sorgo). Il saggio, della durata di 72 ore, consente di rilevare contemporaneamente due diversi effetti (germinazione ed allungamento radicale). I semi delle due dicotiledoni (Cetriolo e Crescione) e della monocotiledone (Sorgo) vengono esposti al campione ed incubati al buio alla temperatura di 25 ± 2 °C per 72 ore. Al termine dell'esposizione, vengono contati i semi germinati e mediante un righello viene misurata la lunghezza (al più vicino millimetro) dell'apparato radicale emerso dai semi. L'effetto sulla germinazione ed allungamento radicale viene espresso come Indice di Germinazione percentuale (IG %).

Per quanto riguarda i saggi su animali, comunemente meno sensibili rispetto alle piante per rilevare le caratteristiche del suolo in una specifica area, in riferimento alla guida tecnica dell'APAT (2002), i principali metodi d'indagine sono:

- test di riproduzione su lombrico (*Eisenia fetida* / *Eisenia andrei*), saggio di laboratorio in cui il campione in esame viene aggiunto a un terreno artificiale dove

vengono posti lombrichi adulti della specie *Eisenia fetida* o *Eisenia andrei*, quali specie rappresentative dei lombrichi. Dopo quattro settimane di esposizione sono determinati la mortalità e gli effetti sulla crescita su lombrichi adulti. Gli adulti sono rimossi dal suolo e gli effetti sulla riproduzione sono valutati dopo altre quattro settimane, contando la discendenza presente nel suolo. Il tasso di riproduzione dei lombrichi presenti nel terreno da testare è paragonato a quello del controllo.

- saggio di tossicità/genotossicità con *Panagrellus redivivus*, che valuta l'impatto dei contaminanti contenuti in fase solida (suolo, sedimenti, fanghi di depurazione, ecc.) sul nematode *Panagrellus redivivus*, molto sensibile negli screening di routine per la valutazione della contaminazione chimica acuta o cronica (McInnis, 1995).

1.3.2 Indici di qualità ambientale

Rispetto ad altre matrici (aria, acqua), la ricerca e l'applicazione di strumenti biologici per identificare la qualità biologica del suolo mostrano ancora un notevole ritardo, imputabile soprattutto alle carenze conoscitive sugli ecosistemi edafici e sui loro singoli componenti. Ad oggi, si hanno esperienze sperimentali e applicative principalmente con riferimento ai bioindicatori (un organismo vivente o una specifica comunità vegetale o animale che, in presenza di un inquinante o miscele di inquinanti, subisce variazioni rilevabili dello stato naturale), bioaccumulatori (un organismo vegetale o animale in grado di accumulare nel tempo specifiche sostanze inquinanti in quantità proporzionali sia alle concentrazioni sia ai tempi di esposizione) e saggi ecotossicologici (APAT, 2002). Il monitoraggio delle comunità del suolo invece è in uno stadio di sviluppo iniziale.

1.3.2.1 Indici di qualità ambientale con i nematodi

Le comunità di nematodi si prestano particolarmente bene alla valutazione della qualità ambientale per l'ecosistema terrestre ma anche per quello marino e dei corsi d'acqua dolce. Infatti, hanno una grande diversità intraspecifica formando vari gruppi eterogenei, sia dal punto di vista trofico, sia in termini di cicli riproduttivi e areali di distribuzione (Bongers, 1990). Inoltre, i nematodi vivono in ogni centimetro cubo di suolo o di sedimento e si estraggono facilmente. Perciò non è difficile disporre di un campione significativo per ogni tipo di ambiente, da quello più intatto a quello più inquinato (APAT, 2002).

L'indice ecologico di qualità ambientale del suolo basato sui nematodi è il *Maturity Index*, indice definito da Bongers (1990). Questo indice viene utilizzato per valutare lo stato globale di inquinamento del suolo o di un sedimento d'acqua dolce o del fondo marino.

E' un indice nematologico non troppo difficile da usare, perché non richiede il riconoscimento delle specie o dei generi, ma solo delle famiglie. Ad ogni famiglia è stato assegnato un valore ecologico che va da 1 (famiglie tipiche di suoli o sedimenti inquinati) a 5 (famiglie tipiche di suoli o sedimenti intatti), com' è riportato nella Tab. 1.2 I valori bassi (1 e 2) appartengono a nematodi colonizzatori (c), cioè opportunisti e capaci di invadere rapidamente habitat instabili, temporanei o inquinati. I valori alti (4 e 5) appartengono a nematodi persistenti (p), cioè a ciclo biologico lento e tipici di habitat stabili e non soggetti a stress o a eventi inquinanti. Pertanto la scala del *Maturity Index* viene espressa come gradiente di valori c-p. La classificazione dei nematodi è così definita:

- c-p 1 *enrichment opportunists* (indicatori di inquinamento organico);
- c-p 2 *general opportunists* (indicatori di altro tipo di inquinamento o di stress);
- c-p 3/5 *persisters* (indicatori di buona qualità del suolo).

Tab. 1.2. Valori c-p per famiglie di nematodi terrestri e acquatici (Bongers 1990 e successive modifiche: 1995 e 1999).

Achromadoridae	3	Ironidae	4
Actinolaimidae	5	Loprolaimidae	2
Aaimidae	4	Leptonchidae	4
Aloionematidae	1	Linhomoeidae	3
Anatonchidae	4	Microaimidae	2
Aporcelaimidae	5	Monhysteridae	2
Aulolaimidae	3	Mononchidae	4
Bastianidae	3	Myclaimidae	1
Bathyodontidae	4	Neodipogasteridae	1
Belondidae	5	Nordidae	4
Buncnematidae	1	Nygolaimidae	5
Cephalobidae	2	Odcntolaimidae	3
Choanolaimidae	4	Odcntopharyngidae	1
Chromadoridae	3	Onchulidae	3
Chrysorematidae	5	Osstellidae	2
Cyatholaimidae	3	Panagrolaimidae	1
Desmodoridae	3	Plectidae	2
Desmoscolecidae	3	Prismatolaimidae	3
Diphtherophoridae	3	Qucsianematidae	4
Diplogasteridae	1	Rhabdiidae	1
Diplogasteroididae	1	Rhabdolaimidae	3
Diplopeltidae	3	Teratocephalidae	3
Diploscapteridae	1	Thomenematidae	5
Discolaimidae	5	Tobrilidae	3
Doryaimidae	4	Tripylidae	3
Ethmolaimidae	3	Tylopharyngidae	1
Halaphanolaimidae	3	Xysidae	2
Hypodontolaimidae	3		

Il calcolo dell'indice richiede, oltre al riconoscimento dei nematodi a livello di famiglia, anche il loro conteggio. I valori assoluti sono poi trasformati in valori percentuali, ottenendo così le frequenze di ogni famiglia, che vengono moltiplicate per il corrispondente valore $c - p$. Sommando i prodotti così ottenuti si calcola il *Maturity Index*. Il *Maturity Index* di una comunità di nematodi varia solitamente da circa 1 (situazioni con forte inquinamento eutrofizzante) a un massimo di circa 4 (situazioni stabili e tendenzialmente oligotrofiche).

1.3.2.2 Indici di qualità ambientale basati sulla mesofauna

La crescente consapevolezza dei problemi legati all'inquinamento dei suoli ha contribuito ad individuare lo studio della pedofauna come una necessità prioritaria nell'ambito dello sviluppo delle ricerche relative alla valutazione della qualità del territorio.

Gli strumenti maggiormente significativi per il monitoraggio di matrici differenti, quali l'acqua e l'aria, si basano al momento su criteri che prendono in considerazione soprattutto la presenza di flora e fauna. Il successo di questo tipo di approcci metodologici suggerisce che, anche per il suolo, lo studio delle biocenosi sia la giusta tematica verso la quale dirigere gli sforzi della ricerca.

La pedofauna compie un ciclo vitale che si svolge in maniera strettamente dipendente dal substrato che la ospita, interagendo con esso in vari modi e dunque le zoocenosi del suolo possono essere considerate importanti descrittori della qualità dell'ambiente.

Per poterle valutare è necessario utilizzare metodologie che consentano di evidenziare il numero di specie presenti o le funzioni ed i processi che esse svolgono.

La zoocenosi che meglio si adatta alla valutazione della qualità del suolo è quella appartenente alle meso-reti, reti trofiche dove interagiscono tra loro i cosiddetti trasformatori della lettiera, corrispondenti alla mesofauna (animali compresi tra 2 e 0,2 mm) e principalmente acari, collemboli, larve di ditteri e di coleotteri, enchitreidi, pseudoscorpioni, alcuni miriapodi, ecc., legati ai pori del suolo (Pokarzhevskii, 1996; Lavelle, 1997).

In generale, gli indici di qualità del suolo basati sugli invertebrati del suolo valutano la consistenza delle popolazioni di microartropodi presenti (Jacomini *et al.*, 2000).

Attualmente non esiste una norma che regoli lo svolgimento delle prove per l'applicazione degli indici biologici di qualità del suolo, quindi le metodologie da utilizzare sono derivate da quanto presente in letteratura e dall'esperienza.

Recentemente, è stata proposta l'applicazione di un indice sintetico per la valutazione della qualità biologica del suolo (QBS-ar), basato sulla consistenza delle popolazioni di microartropodi presenti, che descrive, non solo la funzionalità delle popolazioni di microartropodi, ma anche il livello di biodiversità delle aree analizzate (Parisi, 2001).

Per calcolare l'Indice di qualità del suolo QBS-ar, la prima operazione da svolgere è la determinazione delle forme biologiche degli invertebrati. Per fare ciò, gli esemplari vanno ripartiti in gruppi omogenei, quanto più possibile, dal punto di vista morfologico.

È necessario attribuire ad ogni forma biologica un punteggio numerico, denominato EMI (Indice Ecomorfologico), che varia da 1 a 20, in base al livello di adattamento alla vita edafica.

Se in un campione sono presenti forme biologiche diverse appartenenti allo stesso gruppo, andrà adottato il punteggio più elevato, corrispondente al massimo adattamento mostrato dal gruppo in questione in quella stazione.

La definizione del valore dell'indice QBS-ar per ogni stazione si ottiene sommando gli EMI di tutti i gruppi presenti (Parisi, 2001).

Con i valori ottenuti, è possibile ottenere classi di qualità del suolo, sebbene tale classificazione non sia ancora definita con certezza.

1.4 I Microartropodi

Con il termine microartropodi si fa riferimento agli organismi animali appartenenti al *phylum* degli artropodi (Fig. 1.2), inclusi per dimensione nella mesofauna (dimensioni comprese tra 2 e 0,2 mm).

In base a quanto riportato dal manuale per l'applicazione dell'Indice QBS-ar (Codurri *et al.*, 2005), gli artropodi costituiscono il *phylum* con il più elevato numero di specie (1 milione) e sono presenti in tutti gli ambienti, riuscendo a sopravvivere da 10000 m di profondità nel mare, sino a 6000 m di quota in montagna. Le caratteristiche principali che li caratterizzano sono: corpo diviso in segmenti (o sezioni), appendici articolate, simmetria bilaterale, presenza di un esoscheletro chitinoso (cuticola), sessi quasi sempre separati, generalmente presenza di stadi larvali con caratteristiche anatomiche molto diverse dagli adulti.

Gli artropodi sono suddivisi in due *subphyla*: chelicerati e mandibolati.

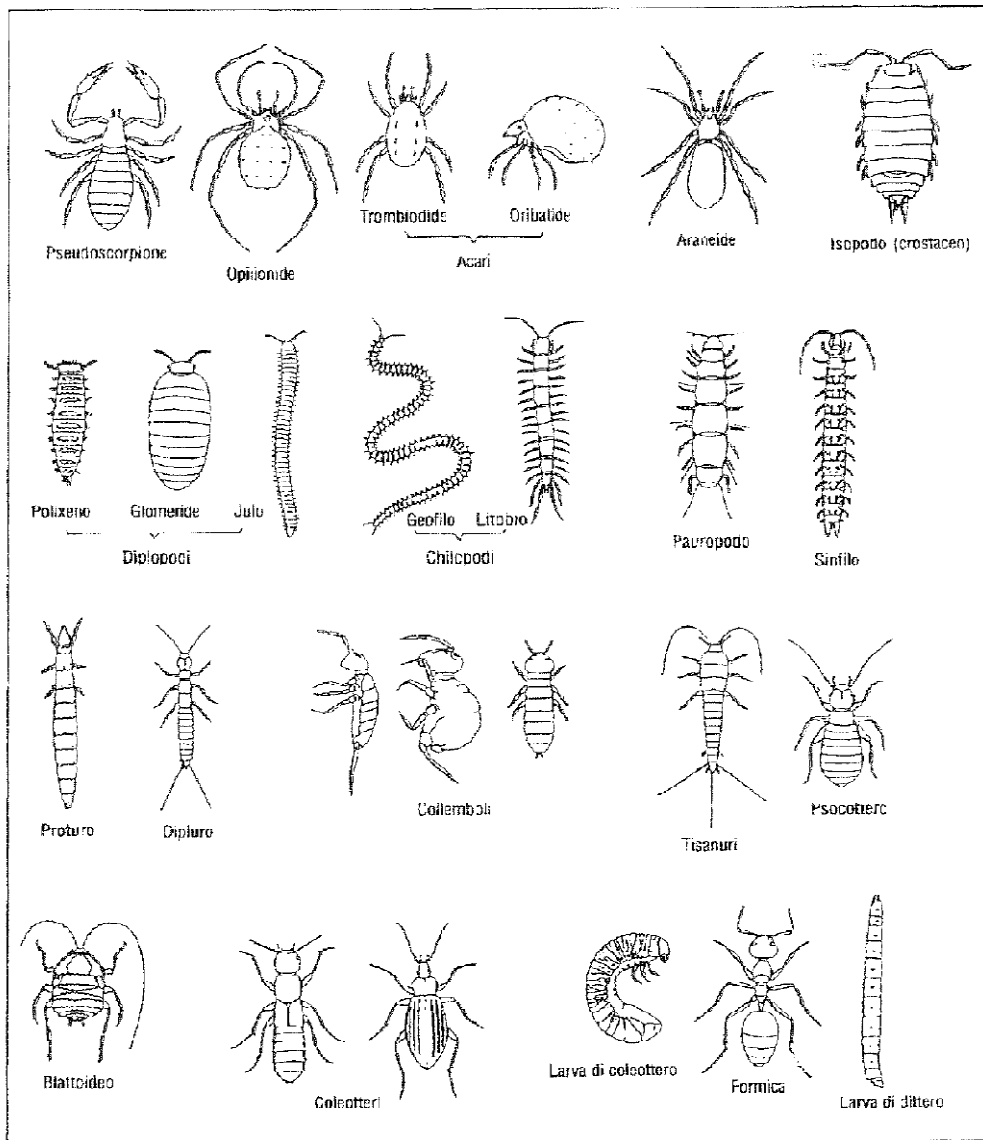


Fig. 1.2 Principali gruppi di artropodi del suolo (Arcidiacono, modificata da Parisi, 2001).

I chelicerati sono caratterizzati dall'aver il corpo diviso in due parti. Quella anteriore, detta cefalotorace, presenta sei paia di appendici articolate: i cheliceri, con funzione in genere alimentare, i pedipalpi, con funzioni alimentari o sensoriali, e le zampe ambulatorie (quattro paia). La parte posteriore è costituita dall'addome, che accoglie la maggior parte dei visceri.

I chelicerati sono così caratterizzati dalla mancanza di un capo, a formare una regione a sé stante, e dalla presenza dei cheliceri (Menta, 2008).

Questo *subphylum* comprende diverse classi, di cui solo quella Aracnida comprende organismi che hanno conquistato il mondo terrestre (Menta, 2008).

Nella classe degli aracnidi l'addome è formato da 11 – 13 segmenti privi di appendici o con alcune particolarmente specializzate, come ad esempio i pettini negli scorpioni e le

filiere nei ragni. I cheliceri, presenti a livello del cefalotorace, sono composti di due o tre parti, che, in quest'ultimo caso, formano una pinza. Le zampe presentano un numero vario di segmenti.

La classe Aracnida comprende numerosi ordini, tra questi, quelli che hanno un'importanza rilevante associata al suolo sono: acari (che probabilmente costituiscono un ordine polifiletico), araneidi, opilioni, palpigradi e pseudoscorpioni (Menta, 2008).

Nello specifico, l'ordine degli acari è quello che assume particolare significato sia per l'elevato numero di specie appartenenti (50000 specie descritte, corrispondenti probabilmente solo al 5% di quelle esistenti) sia per l'enorme capacità di radiazione adattativa, che ha fatto sì di ritrovarli un po' in tutti gli ambienti, compresi quelli estremi.

In generale, gli acari sono organismi di piccole o piccolissime dimensioni (acari deriva infatti dal greco *akari* che significa molto piccolo), comprese in media tra 0.2 e 3 mm, aventi una morfologia molto diversa rispetto agli altri ordini appartenenti alla classe Aracnida.

Il corpo è ovale, privo di un'evidente segmentazione in quanto il cefalotorace e l'addome sono fusi assieme. Nonostante questo, si distinguono una regione anteriore, chiamata gnatosoma, che presenta i cheliceri e i pedipalpi, ed una regione posteriore, il podosoma, che reca nell'adulto quattro paia di zampe ambulatorie, formate da 6 o 7 segmenti, e tre paia nella larva.

Avendo varie modalità di alimentazione, gli acari presentano adattamenti funzionali nella forma dello gnatosoma, dei cheliceri e dei pedipalpi, mostrando un elevato polimorfismo (Fig. 1.3).

Ad esempio, i gruppi succhiatori presentano i cheliceri a stiletto, come nel caso del sottordine Ixodida caratterizzato da acari parassiti ematofagi (tra questi si ritrova la specie *Ixodes ricinus*, molto nota perché possibile portatrice del batterio *Borrelia burgdorferi*, causa della malattia di Lyme, o del virus responsabile della meningoencefalite), oppure i gruppi predatori hanno pedipalpi molto sviluppati.

Gli acari che vivono nel suolo sono spesso ricoperti da setole per trattenere un sottile velo d'aria in caso di allagamento degli interstizi in cui vivono.



Fig. 1.3 Acari. In evidenza la grande variabilità morfologica che li caratterizza (European Atlas of Soil Biodiversity, European Union, 2010).

Il *subphylum* dei mandibolati è contraddistinto dall'avere il corpo diviso in capo e tronco di molti segmenti, in quelli più primitivi, oppure in capo, torace e addome (per differenziazione del tronco), in quelli più evoluti. Le appendici sono formate da una o due paia di antenne, un paio di mandibole, una o più paia di mascelle, tre o più paia di zampe ambulatorie. Le classi più significative, dal punto di vista della vita edafica, sono: crostacei, insetti (esapodi), chilopodi, diplopodi, pauropodi e sinfili. In particolare, per la classe Crostacea si considera solo l'ordine Isopoda che comprende le poche specie che hanno colonizzato le terre emerse. Tra i numerosi ordini appartenenti alla classe Esapoda, quelli che hanno i maggiori rapporti col suolo sono: dipluri, proturi, collemboli, zigentomi, dermatteri, ortotteri, embiotteri, blattodei, psocotteri, emitteri, tisanotteri, coleotteri, ditteri e imenotteri.

Tra questi, l'ordine Collembola è quello che più si discosta dagli altri insetti, tanto che per alcuni dovrebbe essere elevato a sottoclasse e a classe. Insieme agli acari, i collemboli costituiscono la maggior parte degli artropodi che vivono nel suolo, colonizzando praticamente tutti gli ambienti, dal deserto all'Antartide (Menta, 2008).

I collemboli (Fig. 1.4) hanno dimensioni variabili tra 0,2 e 5 mm. Il capo presenta antenne costituite da 4 o 6 articoli e apparato boccale più spesso masticatore ma talvolta anche pungente-succhiante.

Quello che caratterizza maggiormente quest'ordine sono l'addome, formato da soli 6 segmenti che possono essere tutti distinti o parzialmente fusi (generalmente di 10 – 11 segmenti per gli altri insetti) e le appendici: il colloforo, a livello del primo urosternite, con possibile funzione di adesione o di scambio d'acqua e ioni sodio con l'ambiente, il tenacolo, in corrispondenza del terzo urosternite, e la furca, a livello del quinto urosternite. Quest'ultime due appendici, comportandosi come un organo saltatorio, permettono all'animale di compiere dei salti di decine di volte superiori alle dimensioni dell'animale: il tenacolo si aggancia alla furca che, rilasciata, sbatte sul substrato generando il salto.

Nelle forme euedafiche la furca si riduce o addirittura scompare, così come accade per la pigmentazione e per l'apparato visivo.

Si nutrono principalmente di detriti vegetali, polline, funghi e alghe.

La forma larvale è del tutto simile all'adulto, tranne che per le dimensioni.



Fig. 1.4. Diverse forme biologiche di Collemboli. In alto a sinistra la forma epigea, caratterizzata da presenza di furca, appendici allungate e ben sviluppate, apparato visivo ben sviluppato, livrea complessa. In alto a destra la forma emi-edafica, rispetto alla forma epigea non presenta appendici ben sviluppate. In basso forme eu-edafiche, caratterizzate da depigmentazione, assenza di furca, appendici tozze e pseudoculo (European Atlas of Soil Biodiversity, European Union, 2010).

2. Obiettivi

Il presente lavoro di tesi è parte di uno studio più ampio, tuttora in corso, che ha come obiettivo la valutazione della qualità biologica dei suoli della Pineta di San Vitale di Ravenna e più in generale l'analisi della struttura del popolamento dei microartropodi edafici, in relazione all'ambiente chimico e fisico ed in particolare agli effetti della salinizzazione della falda freatica e del suolo.

Vengono qui riportati i risultati relativi all'indagine primaverile.

In particolare lo studio intende rispondere ad alcune domande:

- Come varia la qualità biologica del suolo (valutata con il metodo QBS-ar) e la composizione del popolamento lungo il gradiente che va dalle sommità dunali alle bassure interdunali? È possibile stabilire un pattern di variazione generale? È possibile individuare popolamenti tipici associati a ciascuno dei tre pedotipi Pirottolo, Cerba, S. Vitale?
- È possibile evidenziare un effetto della salinizzazione sull'indice QBS-ar e sulla composizione del popolamento? In particolare, la salinizzazione determina un'alterazione nel pattern di variazione del popolamento lungo il gradiente Pirottolo-S. Vitale?
- È possibile spiegare le differenze osservate nel popolamento sulla base delle caratteristiche chimiche e fisiche del suolo o sulla base della tipologia di humus?

Questo studio potrebbe costituire anche una base per valutare l'evoluzione del fenomeno della salinizzazione nel tempo e l'efficacia di eventuali interventi attuati per contrastarla. Sembra particolarmente importante documentare la situazione delle zone con suoli Cerba. Si tratta infatti delle aree più estese all'interno della pineta e probabilmente più soggette a trasformarsi in conseguenza delle variazioni del livello della falda.

In questo contesto, il presente lavoro di tesi riguarda i risultati del campionamento primaverile, il primo dei due previsti.

Questo campionamento ha come scopo quello di documentare la condizione del popolamento in un momento dell'anno in cui ci si aspetta siano minimi gli effetti dovuti alla salinizzazione, in modo da fornire un termine di confronto per il successivo campionamento estivo, eseguito nel periodo dell'anno in cui ci si attendono più elevati valori di salinità nella falda e nel suolo.

3. Descrizione dell'area di studio

3.1 Inquadramento geografico

L'area di studio ricade interamente all'interno dei confini della Pineta di San Vitale area SIC e ZPS, IT4070004 "Pialasse Baiona, Risega e Pontazzo" (Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli, 2003).

La Pineta di San Vitale è situata a nord della città di Ravenna, lungo la fascia costiera delimitata a nord dall'ultimo tratto del Canale Destra Reno, poco prima dello sbocco in mare, e a sud dallo scolo Canala.

Come si può osservare nella Fig. 3.1, il lato occidentale della pineta confina con la S.S. Romea mentre ad est è affacciata sull'area salmastra di circa 1.200 ettari costituita, procedendo da nord verso sud, dalla Piallassa Baiona, la maggiore, che si estende fra il Lamone e lo Scolo Fossatone, la Pialassa della Risega fra il Fossatone e lo Scolo Via Cerba, ed infine quella del Pontazzo che occupa la parte meridionale del territorio, sino allo Scolo Canala (Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli, 2003).

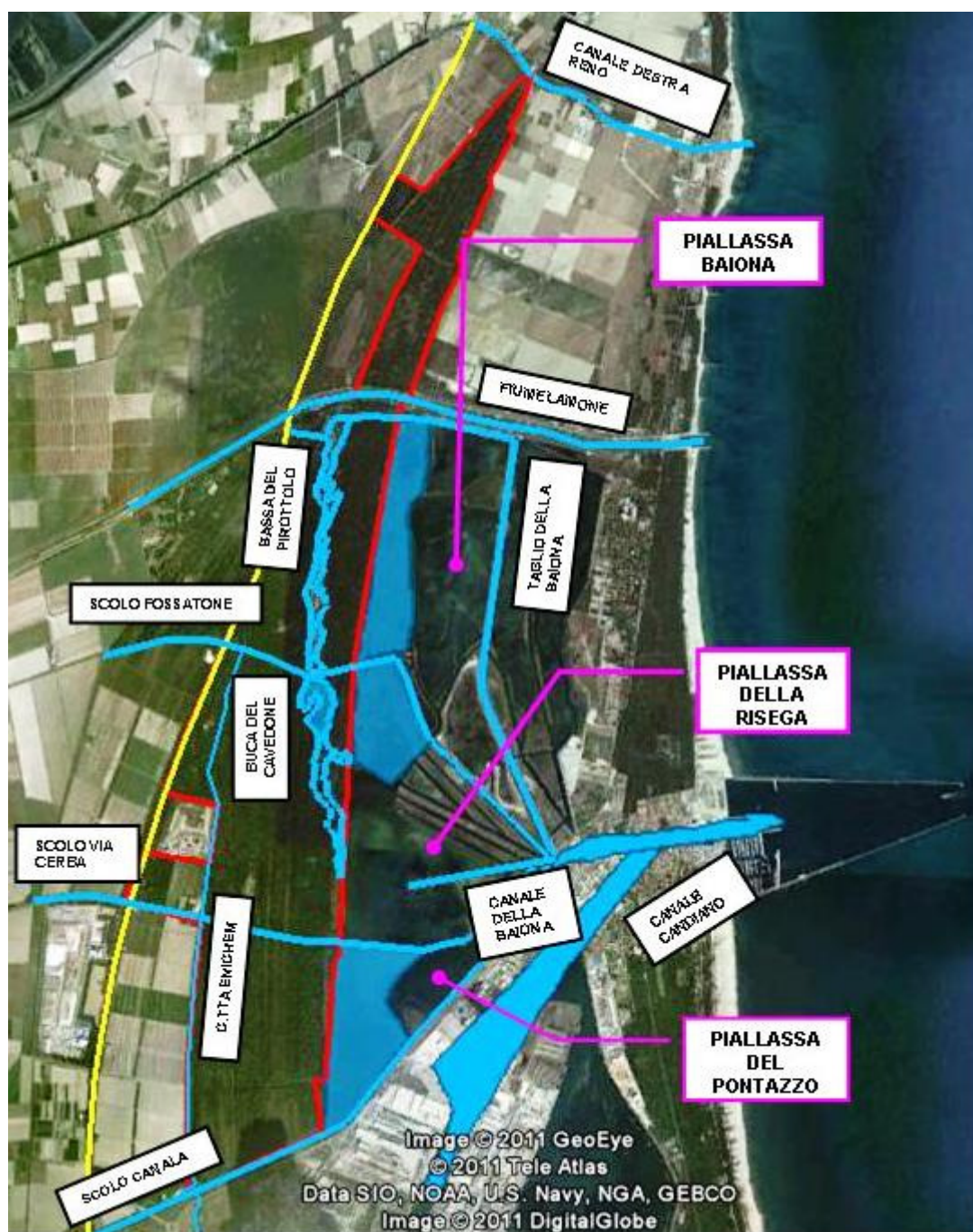


Fig. 3.1. Inquadramento idrografico superficiale della Pineta di San Vitale (Google Earth, modificata). In rosso è indicato il confine della pineta e in giallo la S. S. Romea.

Le Piallasse, sulle quali si affaccia il lato orientale della pineta, sono i resti, assieme alla Piallassa del Piombone, della grande laguna all'interno della quale sorgeva nell'antichità la città di Ravenna. Sono lagune divise dal mare da una striscia di terra (tombolo) continua e ad esso collegate tramite una rete di canali posti a ventaglio, che convergono nel Canale della Baiona, collegato al Canale Candiano.

Il loro nome deriva dalla combinazione di *pia* (piglia) e *lassa* (lascia) che rispecchia la loro funzione, cioè quella di rispondere alla dinamica marina subendo il flusso della marea. Infatti, tali condotti sono stati così costruiti per facilitare l'ingresso dell'onda di marea creando, con il flusso e il riflusso delle acque di mare al loro interno, delle correnti nella zona portuale che, impedendo ai detriti in sospensione di depositarsi, li portano al di fuori della zona delimitata dai due moli foranei, evitando così l'interramento del porto (Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli, 2003).

Lamone, Scolo Fossatone, Scolo Via Cerba attraversano la pineta da ovest a est. In senso longitudinale, da nord a sud, essa è attraversata dalla Canaletta dell'Enichem e dalla Bassa del Pirottolo. La Canaletta è stata costruita per alimentare con acqua dolce, proveniente dal canale Fossatone, lo stabilimento industriale omonimo e l'impianto di potabilizzazione dell'acquedotto di Ravenna; la Bassa del Pirottolo costituisce una depressione allagata con acqua da dolce a salmastra e sorge sui resti di un antico territorio interdunale, che ha origine dall'argine meridionale del Lamone, il quale la separa dalle praterie umide del Bardello, che un tempo ne costituivano la naturale prosecuzione. Il suo corso meandriforme, interamente situato all'interno della pineta, si snoda per circa 6 km, con una larghezza minima attestata intorno ai 50 m e massima di circa 200 m, per terminare in un'ansa di fronte alla Buca del Cavedone, ai margini occidentali della Piallassa della Baiona (Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli, 2003).

Come si può osservare nella Fig. 3.2, tutto il territorio della Pineta di S. Vitale, che presenta una superficie di circa 1312 ha sviluppata per una lunghezza pari a circa 11 km, è inserito all'interno del Parco Regionale del Delta del Po Emilia-Romagna, nella Stazione 4 "Pineta di San Vitale e Piallasse di Ravenna", come definito dai Piani Territoriali delle Stazioni del parco.

In particolare, il territorio in esame è classificato, in base al Piano Territoriale di Stazione adottato con C.C. 279/23841 del 14/05/1991, come Zona "Pre Parco", ad eccezione di alcune aree limitrofe alla S.S. Romea (Zona C).

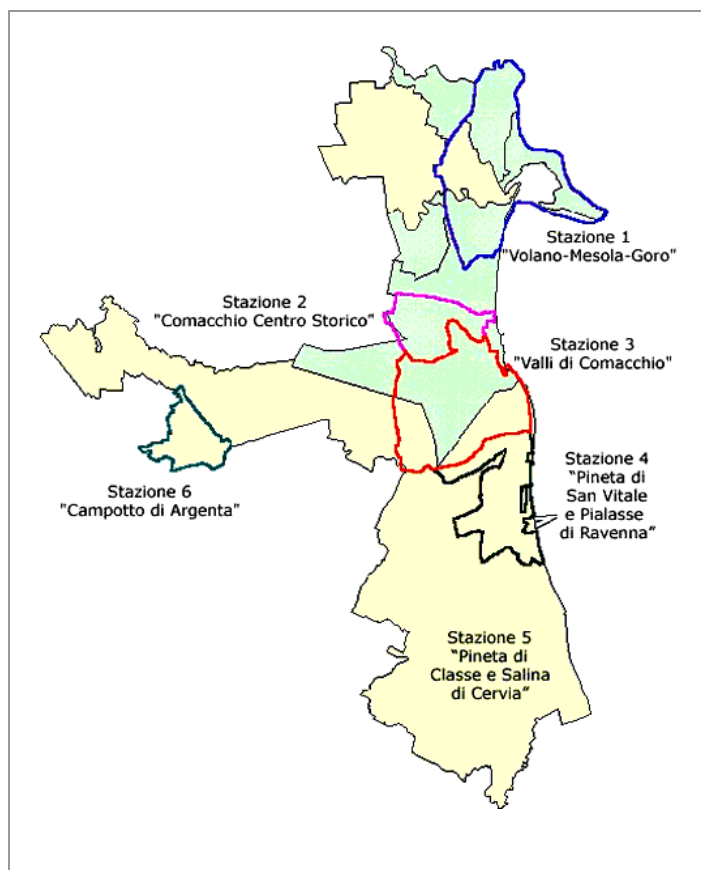


Fig. 3.2 Posizione della Stazione 4 “Pineta di San Vitale e Pialasse di Ravenna”, che comprende la zona d’interesse, all’interno del Parco del Delta de Po Emilia-Romagna (www.parcodeltapo.it).

Inoltre, tale territorio è sottoposto a vincolo idrogeologico forestale su R.D. 3267/23 ed è area SIC e ZPS (IT4070003 – “Pineta di San Vitale, Bassa del Pirottolo”) in base alle Direttive 79/409 e 92/43 CEE (Fig. 3.3).

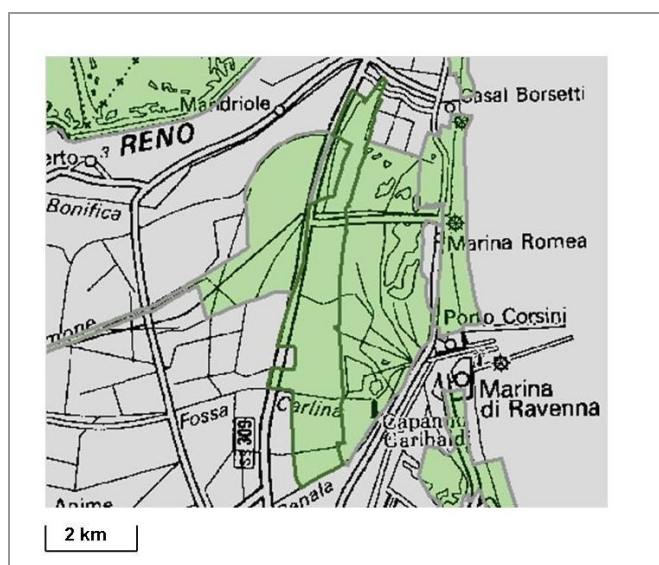


Fig. 3.3 Sito IT4070003 - SIC-ZPS “Pineta di San Vitale, Bassa del Pirottolo” (delimitato dalla linea verde), nel quale si inserisce il territorio indagato (www.regione.emilia-romagna.it).

3.2 Origine della zona d'interesse

La Pineta di San Vitale si inserisce all'interno della pianura costiera romagnola, corrispondente alla parte sud orientale della Pianura Padana.

Le origini del territorio in esame sono da ricercare a partire dalla fine del Pliocene, circa 2 milioni di anni fa, quando al posto della Pianura Padana esisteva un bacino marino profondo tra i 150 e i 200 m chiamato "Golfo Padano". Nel corso del Quaternario, tale golfo è stato progressivamente riempito dai detriti trasportati dai corsi d'acqua superficiali, provenienti inizialmente solo dalle Alpi, la cui orogenesi risale al Miocene, e in seguito anche dagli Appennini, la cui orogenesi è più recente e si è conclusa nel Pleistocene.

Sotto l'azione del fenomeno della subsidenza, al crescente apporto di sedimenti è corrisposto un lento effetto di sprofondamento del fondo del golfo, che ha permesso il depositarsi di una spessa coltre di materiali fini, soprattutto argille e sabbie (Ricci Lucchi *et al.*, 1990; Pellegrini & Tellini, 2000).

Al termine del processo di riempimento del bacino, che ha portato alla formazione della pianura emersa dalle acque marine, i fiumi alpini e appenninici hanno continuato a trasportare materiale detritico formando sulla pianura una sottile copertura alluvionale dello spessore massimo di qualche centinaio di metri e, allo stesso tempo, confluendo e raccogliendosi tra loro, hanno dato origine al fiume Po (Cencini & Piastra, 2007).

Un ulteriore aspetto importante che ha influito sulla genesi del territorio d'interesse è quello relativo alle cinque glaciazioni che hanno interessato il Quaternario. Infatti, durante le fasi glaciali, intervallate da fasi interglaciali, si è osservata una regressione del livello marino, con conseguente emersione di vari settori del fondale adriatico. Terminate le glaciazioni ed instauratosi l'*optimum* climatico post-glaciale, attorno a circa 6000 anni fa, è iniziata invece una fase di trasgressione marina con conseguente innalzamento del livello del mare ed un arretramento della linea di costa sino a 50 km più all'interno rispetto a quella attuale.

Successivamente, il livello marino si è leggermente abbassato sino alla conformazione attuale della linea di costa (Ciabatti, 1990).

Oltre ai macro-processi fin qui descritti, volendo scendere più nel dettaglio considerando l'evoluzione della fascia costiera romagnola a nord della città di Ravenna nella quale si inserisce la Pineta di San Vitale, si può prendere in esame lo studio effettuato da Ciabatti (1966). Tale studio è relativo ai cordoni litorali antichi e recenti, derivanti dai materiali solidi trasportati verso il mare dai fiumi appenninici e dal Po, in relazione all'evoluzione della regione considerata a partire dagli ultimi 3000 anni.

Da tale studio emerge che, in una generale situazione di rapida evoluzione geomorfologica del sistema idrografico padano, vi sia stato un progressivo avanzamento della linea di costa, testimoniato dalla disposizione dei cordoni litorali antichi in relazione al loro periodo di formazione.

Come si può osservare nella Fig. 3.4, la Pineta di San Vitale sorge su uno dei cordoni litorali più recenti, formato attorno al 1600.

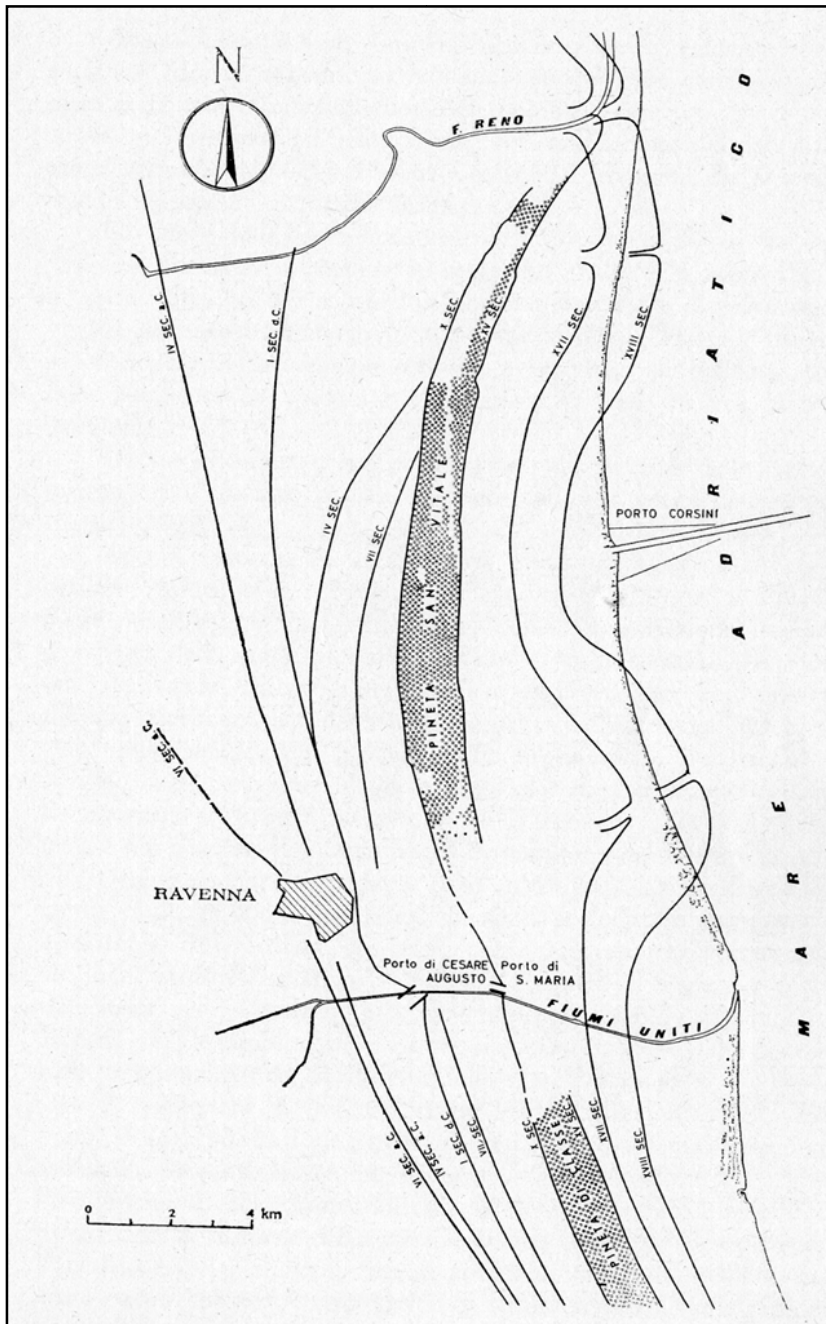


Fig. 3.4 Evoluzione della linea di costa in epoca storica nel Ravennate (Scossiroli, 1974).

3.3 Gli interventi antropici

Anche se si ritrovano testimonianze dell'opera dell'uomo già in età preistorica e nel periodo romano, gli effetti maggiori in termini di trasformazione del paesaggio costiero Ravennate sono iniziati a partire dal XVIII secolo e soprattutto durante il XIX ed il XX secolo.

Una modificazione significativa ha riguardato i corsi d'acqua che sono stati totalmente arginati e in alcuni casi soggetti a deviazione artificiale. Ad esempio, nel periodo compreso tra il 1733 ed il 1739 fu spostato lo sbocco dei Fiumi Uniti, risultato dell'unione dei fiumi Ronco e Montone, laddove oggi sorgono Lido Adriano e Lido di Dante, più a sud rispetto allo sbocco originale sito in corrispondenza della zona in cui sorge l'attuale Punta Marina (Guizzetti, 1741, citato in Cencini & Piastra, 2007).

Allo stesso tempo, sono stati aperti dei canali artificiali, tra questi il più famoso, anche se di epoca antica, risulta essere il "Fossa Augusta", canale semi-artificiale navigabile di età romana imperiale ad andamento subparallelo rispetto alla linea di costa, costruito per collegare le lagune interne di Ravenna con i rami meridionali del Po dell'epoca (Cencini & Piastra, 2007).

Altro elemento di modifica dell'assetto idraulico riguarda le Piallasse, grandi lagune salmastre sviluppatasi a partire dal XVII secolo per progressiva occlusione di un braccio di mare in seguito alla costituzione di nuovi cordoni dunosi costieri (Roncuzzi, 1994), regimate idraulicamente sin dalla loro formazione.

Sulle stesse Piallasse, e più in generale sugli specchi d'acqua dolce o salmastra retrostanti la fascia litoranea e le pinete storiche, sono stati effettuati anche degli interventi di bonifica. Sia per la portata dell'intervento che per l'interesse specifico assunto in relazione alla vicinanza e dunque alle conseguenze sulla zona indagata, assume particolare rilievo la bonifica per colmata del Lamone.

All'inizio del secolo scorso il fiume Lamone, appena oltrepassata la strada che collega Ravenna con S. Alberto, non aveva un corso ben definito e mancava di uno sbocco diretto al mare, per cui le sue acque si disperdevano in una vasta distesa di valli. Le piogge torrenziali e la rotta degli argini dell'anno 1839 costrinsero il Governo Pontificio a predisporre una sistemazione idraulica che, invece di prevedere il prosciugamento dei vasti territori allagati ed il ripristino dei vecchi ed ormai precari argini, si orientò verso la costruzione di un'ampia cassa di colmata, un'area di oltre 7000 ettari, denominata appunto del Lamone, destinata a raccogliere le acque del fiume ed il materiale da esse trasportato durante i periodi di piena, impedendo il loro dilagare nella circostante pianura coltivata e

favorendo, allo stesso tempo, la bonifica dell'area paludosa. Il deflusso delle acque verso il mare fu poi attuato mediante la creazione di una rete di canali che percorrevano la Piallassa della Baiona.

Il riempimento della cassa si è protratto per oltre un secolo sino ai primi decenni del XX secolo. Della grande cassa di colmata resta oggi un piccolo relitto di circa 500 ettari frazionato in due comprensori dal corso del fiume Lamone, completamente inalveato negli anni '60 e ricondotto al mare, praticando un taglio attraverso la Pineta San Vitale (Nardi, 1987).

La costruzione della cassa di colmata ha avuto delle ripercussioni sull'ambiente circostante associate principalmente alla riduzione dei materiali solidi trasportati dal corso d'acqua al mare, con conseguente mancato ripascimento dell'area litoranea in cui esso sfociava. Ne è conseguita una forte erosione costiera che, soprattutto nel corso del XIX secolo, ha comportato il parziale smantellamento dell'originale apparato di foce del fiume Lamone posto presso Casal Borsetti, laddove oggi sfocia il Canale Destra Reno. (Cencini *et al.*, 1979).

Un ulteriore processo che ha come conseguenza l'erosione costiera, tramite il meccanismo del mancato apporto di sedimenti alle spiagge, è quello relativo alla costruzione di sbarramenti lungo i corsi d'acqua romagnoli per la creazione di invasi. Tra questi ritroviamo ad esempio il bacino artificiale di Ridracoli nell'alto Bidente, portato a termine intorno agli anni '80 e che contribuisce al manifestarsi di fenomeni erosivi sulla costa, presso la foce dei Fiumi Uniti

Infine, una causa potenziale di riduzione di apporti solidi alla zona costiera risulta essere l'estrazione di sabbie e ghiaie in zone di alveo e perialveo fluviale, un tempo molto diffusa ma oggi di entità limitata (Cencini & Piastra, 2007). Secondo quanto riportato dall'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli (2003) tra il 1957 ed il 1971 fu estratto un volume pari a circa 5 milioni di tonnellate.

A fronte del problema dell'erosione costiera, negli ultimi decenni si sono osservati degli interventi tampone nel tentativo di ridurre e prevenire l'arretramento del litorale ravennate (Benassai *et al.*, 1979).

Pertanto, sono state realizzate delle opere di difesa costiera poste principalmente al largo, ma anche alcune aderenti alla costa, e più recentemente si sta provvedendo al ripascimento artificiale delle spiagge più in pericolo con sabbie prelevate dai fondali adriatici (Cencini & Piastra, 2007).

Un altro importante problema che coinvolge il territorio in esame, riguarda il fenomeno della subsidenza, ossia dell'abbassamento del suolo, dovuto sia a cause naturali che antropiche.

La subsidenza naturale nel ravennate è associata principalmente alla compattazione differenziata dei sedimenti, calcolata intorno ai 2-3 mm/anno negli ultimi 2500 anni (Gambolati & Teatini, 1998).

La subsidenza artificiale è stata provocata da molteplici fattori, tra questi quello iniziale è riconducibile alle arginature degli alvei fluviali dal XII secolo in poi (Fabbri, 1987). Tali barriere se da un lato hanno impedito le inondazioni, dall'altro hanno provocato il mancato apporto di sedimenti alluvionali nelle aree interfluviali, con conseguente abbassamento di ampie superfici comprese tra gli argini fluviali e i cordoni dunali costieri, oggi sottoposte a drenaggio meccanico.

Ulteriori cause del fenomeno sono associate all'azione di bonifica, di cui si è accennato in precedenza, corrispondenti all'ossidazione di strati di torbe nei suoli bonificati (Buscaroli & Zannoni, 2006) e al drenaggio forzato delle acque superficiali e dalla falda.

Già nella prima metà del '900 ma soprattutto a partire dagli anni '50, le principali cause che hanno determinato l'inequivocabile aumento dei tassi di subsidenza sono state lo sfruttamento dei bacini metaniferi, associato alle attività del nascente polo industriale di Ravenna, e l'intenso emungimento di acque dal sottosuolo da destinare ad un'intensa agricoltura, oltre che alle stesse attività industriali.

In proposito, si ricorda il caso dell'estrazione di acque metanifere da giacimenti quaternari effettuata fra il 1938 e il 1963 (Borgia *et al.*, 1982).

I massimi valori di abbassamento vennero osservati dal 1972 al 1977 soprattutto nella zona industriale di Ravenna. In tale sito tra il 1972 e il 1973 furono registrati valori pari anche a 110 mm/anno. Nello stesso periodo in Pineta San Vitale si avevano tassi di subsidenza crescenti da nord verso sud da 35 a 55 mm/anno (Teatini *et al.*, 2005).

Successivamente la subsidenza è andata diminuendo, sia per graduale esaurimento del principale campo gassifero di Ravenna (Ravenna Terra), sia per la sostituzione dell'approvvigionamento idrico da acque sotterranee con l'adduzione di acque di superficie dal Reno e dall'acquedotto della diga di Ridracoli (Preti, 2000).

Attualmente, il fenomeno risulta essere in riduzione soprattutto nell'entroterra dove si registrano tassi di subsidenza inferiori a 3 mm/anno. Nelle vicinanze della costa, per alcune aree si registrano ancora valori attorno ai 10 mm/anno, ad esempio in corrispondenza del pozzo di estrazione "Dosso degli Angeli", all'interno della zona di Bellocchio, entrato in

funzione all'inizio degli anni '70 (Teatini *et al.*, 2005), e del pozzo "Angela-Angelina" a largo della foce dei Fiumi Uniti, ma i cui effetti si fanno sentire anche sulla costa.

3.4 Origini storiche della pineta

La Pineta di San Vitale costituisce il residuo settentrionale dell'antica pineta a *Pinus pinea* della provincia di Ravenna, di origine antropica. Nel XVIII secolo si estendeva ininterrottamente dal fiume Lamone al fiume Savio (Zangheri, 1936, in Cencini & Piastra, 2007).

I primi riferimenti scritti circa la presenza di pinete nel territorio ravennate si rifanno a delle testimonianze di storici latini di epoca romana che scrivono dell'esistenza di un bosco di pini nelle vicinanze di Ravenna, destinato a rifornire il porto romano del legname necessario per le costruzioni navali (Cencini & Piastra, 2007).

Con la caduta dell'Impero Romano d'Occidente tali pinete vennero cedute da Giustiniano all'Arcivescovo Agnello, iniziando così un lungo e prosperoso dominio monastico delle Pinete. In quel tempo (attorno al V secolo d.C.), in base alle datazioni effettuate sui paleocordoni dunali, risulta che la linea di costa fosse posizionata più ad ovest rispetto a dove oggi si collocano le pinete di origine più antica, come quella di San Vitale. Queste verranno piantumate sull'insieme di cordoni litoranei originati a partire dal X secolo, sino al XV secolo, dagli apporti sedimentari del Po di Primaro e dei fiumi appenninici più a sud (Veggiani 1974, Ciabatti, Veggiani 1990).

L'impianto delle Pinete odierne risale probabilmente tra il XIV ed il XV secolo, ad opera delle comunità monastiche delle quattro abbazie della città di Ravenna, cioè S. Vitale, Classe, S. Giovanni e S. Maria in Porto (Cencini & Piastra, 2007).

Durante il lungo e prosperoso dominio monastico, le pinete crebbero rapidamente in estensione, raggiungendo la loro massima ampiezza verso la fine del settecento quando si estendevano per 36 km formando un *continuum* dal fiume Lamone sino al fiume Savio, coprendo una superficie allora valutata di 7417 ettari (Zangheri, 1936).

In questo periodo la coltura del pino forniva alla città di Ravenna una grande quantità di legname da opera, pigne per il riscaldamento, essenze resinose da usare in ambito farmacologico e in profumeria e, soprattutto, pinoli per uso alimentare.

Nel 1797, con l'invasione francese e la successiva soppressione delle corporazioni religiose, le abbazie persero definitivamente il controllo sulle pinete e la loro gestione passò alla Repubblica Cisalpina. I beni di proprietà monastica vennero ceduti a privati che rapidamente misero a coltura agraria larghe aree boscate (Fabbri e Missiroli, 1998).

Ritornate sotto proprietà del Demanio Pontificio, nel 1836 ne fu affidata la gestione in comodato d'uso alle Canoniche Lateranensi, le quali a loro volta le concedevano ad affittuari spesso per nulla interessati a garantirne la conservazione (Zangheri, 1936).

Sotto i successivi proprietari le pinete subirono abusi, saccheggi, diradamenti e tagli e per tale cattiva gestione, nel corso del XIX secolo, si ebbero le maggiori distruzioni delle pinete.

Col passare del tempo, gli interventi hanno ridotto l'estensione della superficie boschiva a poco più di 2000 ettari, circa un quarto della superficie originaria, divisi nei due nuclei di San Vitale e di Classe, situati rispettivamente a nord e a sud della città di Ravenna (Cencini & Piastra, 2007)

A fronte di tale situazione disastrosa, nel 1905, sotto la proposta del ravennate Luigi Rava, docente universitario ed in seguito Deputato e Senatore del Regno d'Italia, venne approvata una legge che garantiva il possesso da parte del Demanio sui cordoni dunali a ridosso della spiaggia e ne promuoveva il rimboschimento (Fabbri e Missiroli, 1998).

Successivamente, nel 1908, sempre lo stesso Rava, divenuto Ministro alla Pubblica Istruzione, promosse un'altra legge che allargò l'acquisto e il rimboschimento da parte dello Stato ad altri arenili della Provincia di Ravenna.

Nonostante tali sforzi, nel tempo si sono avute altre gravissime distruzioni prima a causa della Seconda Guerra Mondiale, come testimoniato dalla prosa "Quando c'era la pineta" di Arfelli (1976), ed in seguito, negli anni '60 e '70, in relazione allo sviluppo industriale e al turismo di massa.

In particolare, in relazione all'attuale assetto della Pineta di San Vitale, a partire dalla metà degli anni cinquanta ci fu l'insediamento di un grande stabilimento petrolchimico dell'ANIC, collocato ai lati del canale di porto, su terreni un tempo facenti parte della pineta (Cencini & Piastra, 2007). Tale opera, assieme al porto e alle industrie cresciute nelle vicinanze, furono determinanti per il deperimento della pineta, oltre a determinare l'inquinamento delle acque e dell'aria (Scossiroli 1974).

3.5 Il problema della salinizzazione

In base allo studio effettuato da Giambasiani (2006) inserito all'interno di un lavoro più ampio relativo all'intrusione di acqua marina nell'acquifero della costa meridionale della Pianura Padana (Antonellini *et al.* 2008), grazie al quale è avvenuta la ricostruzione delle carte stagionali delle isoaline tra l'autunno 2004 e l'estate 2005 (Fig. 3.7), emerge che la Pineta di San Vitale è soggetta in parte a problemi di salinizzazione dell'acquifero.

Le cause di tale fenomeno sono molteplici e riconducibili sia a fattori naturali che antropici.

Innanzitutto, il territorio in esame presenta alcune aree che per loro natura sono a quote di poco superiori o addirittura inferiori al livello marino, e pertanto è favorita l'ingressione di acqua marina sia nell'acquifero che a livello delle acque superficiali (Antonellini *et al.* 2008).

Allo stesso tempo, dal 1950 si osserva un progressivo abbassamento del livello del suolo nell'area costiera in associazione a fattori quali la subsidenza, la distruzione dei rilievi dunali, l'erosione costiera e la riduzione se non la mancanza di apporti di sedimenti alluvionali (APAT, 2002).

Pertanto, il territorio presenta una topografia che determina un'altezza del livello piezometrico insufficiente a contrastare l'ingressione salina, in base al principio di Badon Ghyben-Herzberg (Fig. 3.5), che descrive la posizione dell'interfaccia tra acqua dolce e acqua salata per un acquifero costiero in condizioni di flusso stazionario (Antonellini *et al.* 2008).

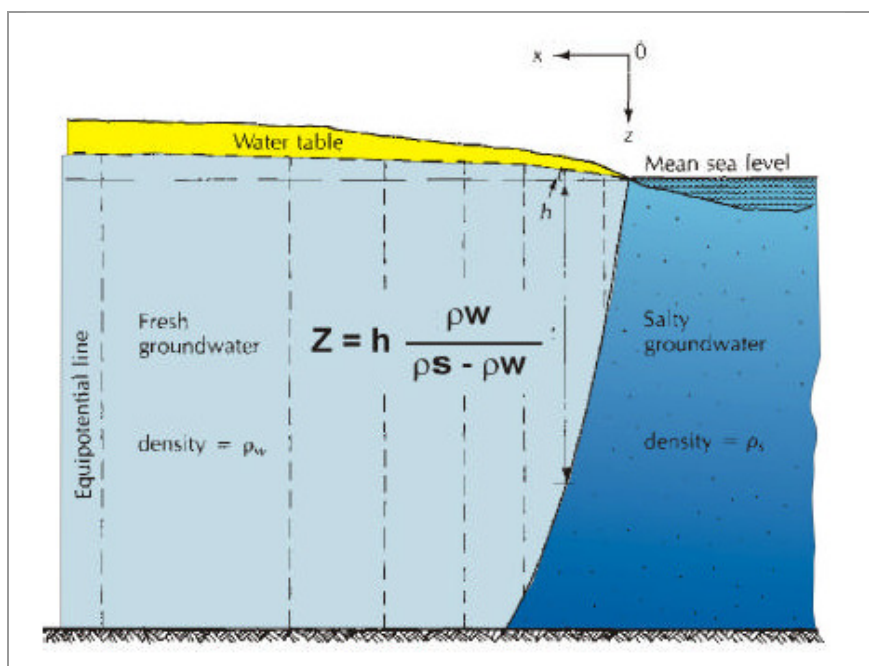


Fig. 3.5. Relazione di Ghyben-Herzberg per un acquifero freatico costiero(da Fetter, 2001; modif. da Giambastiani, 2006). In particolare, ρ_w e ρ_s sono la densità dell'acqua dolce e dell'acqua salata rispettivamente, z è la profondità dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata e h è la quota della falda sopra il livello del mare.

Un ulteriore aspetto che favorisce l'intrusione salina è quello relativo alla limitata ricarica dell'acquifero costiero, sia per le scarse precipitazioni, corrispondenti a circa 600 mm/anno, che per le relative alte temperature (media annuale intorno ai 14.5°C), soprattutto

nel periodo estivo. In particolare, in pineta, dove si osservano tassi di evapotraspirazione elevati, la ricarica dell'acquifero corrisponde a soli 14 mm/anno (Antonellini *et al.*, 2008). Bassi tassi di ricarica dell'acquifero associati ad un'elevata conduttività idraulica favoriscono l'intrusione salina, come risulta dal modello fornito da Ghyben-Herzberg-Dupuit (Fig. 3.6), che descrive la posizione dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata per un acquifero non confinato in condizioni di flusso stazionario (Todd 1953).

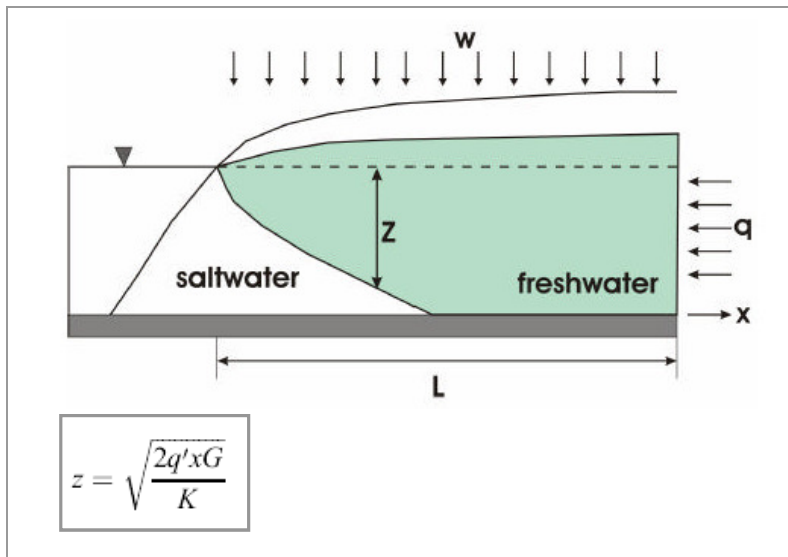


Fig. 3.6. Modello di Ghyben-Herzberg-Dupuit per un acquifero freatico non confinato, dove $G = \rho_w / (\rho_s - \rho_w)$, q' è la ricarica naturale dell'acquifero, x è la distanza dalla costa e K è la conduttività idraulica (Giambastiani, 2006).

Infine, anche la presenza di canali di drenaggio e d'irrigazione favorisce il processo dell'ingressione di acqua marina (Antonellini *et al.*, 2008).

L'insieme di tutti questi fattori provoca dunque un problema di salinizzazione dell'acquifero che, osservando le carte delle isoaline, presenta una distribuzione differenziata sia a livello spaziale, interessando solo parte della pineta e non tutta l'area, che a livello temporale.

La salinità aumenta verso la Piallassa e in prossimità delle zone più depresse, come la Buca del Cavedone.

Valori elevati, prossimi a quelli dell'acqua di mare, si registrano nell'area meridionale della pineta e nell'area adiacente alla Piallassa della Risega, l'unico Chiaro ancora aperto e collegato con il resto della laguna.

Attraverso la Piallassa, i canali e in maggior misura il fiume Lamone, si osserva una risalita di acqua salata. In particolare, i canali di Via Cerba e lo Scolo Canala presentano, a monte delle idrovore, una bassa salinità; viceversa questa aumenta a valle delle stesse.

Considerando l'aspetto stagionale, si evidenzia, soprattutto lungo il fiume Lamone, una risalita maggiore di acqua salata nel periodo estivo, dovuta alla riduzione della portata di acqua dolce verso il mare.

Una risalita di acqua salata si rileva anche in corrispondenza del Taglio della Baiona durante il periodo invernale. Tuttavia, in questo caso si tratta di un episodio particolare da imputare al mancato funzionamento delle paratoie nel periodo autunnale, che evidenzia comunque un altro punto critico dove è possibile l'ingressione marina (Giambastiani, 2006).

Infine, le carte forniscono un inquadramento del problema della salinizzazione anche per alcune parti dell'area salmastra compresa tra la pineta ed il mare, ovvero, procedendo da nord verso sud, i chiari del Comune, di Mezzo (o del Cavedone) e del Pontazzo, che sono porzioni totalmente chiuse negli ultimi anni delle tre Piallasse presenti (paragrafo 3.1).

Essi ricevono acqua dolce proveniente dai canali di scarico delle idrovore ma, per azione del vento, l'acqua dolce superficiale viene miscelata con l'acqua salata più profonda comportando variazioni stagionali non molto evidenti (Giambastiani, 2006).

Sebbene siano stati realizzati con funzione tampone per limitare l'ingresso d'acqua salata dalle Piallasse alla pineta, avendo un basso carico idraulico (al massimo qualche cm sopra il livello del mare), la loro azione è insufficiente a contrastare l'intrusione salina dal fondo, tanto che nella zona della pineta adiacente all'area salmastra si registrano valori di salinità addirittura maggiori che non nei chiari stessi (Giambastiani, 2006).

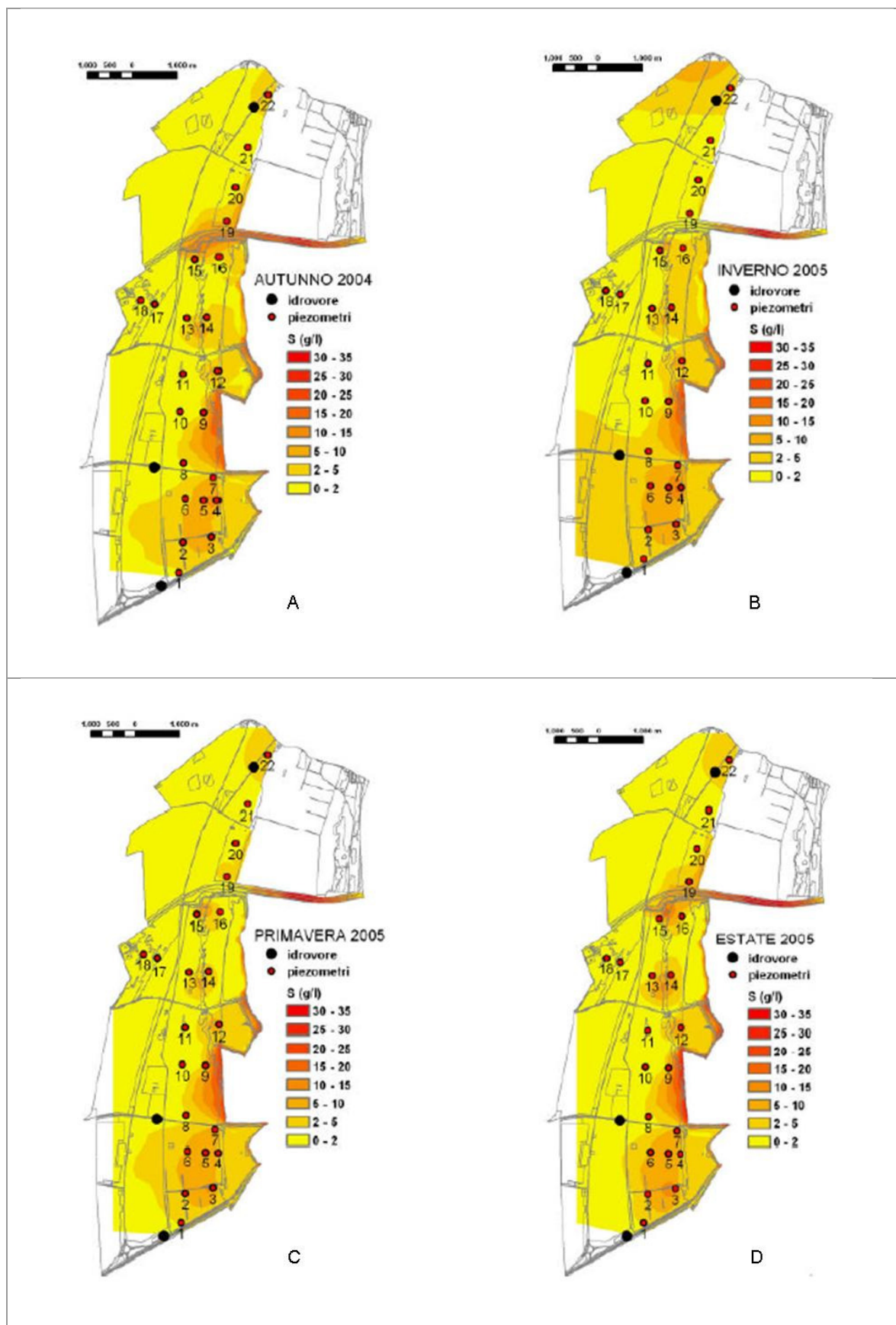


Fig. 3.7. Carte della distribuzione della salinità misurata alla superficiale della falda nei periodi autunnale (A), invernale (B), primaverile (C) ed estivo (D) (Giambastiani, 2006).

3.6 Inquadramento pedologico

In base alla classificazione fornita dalla Carta dei Suoli della Regione Emilia-Romagna in scala 1:250000 (RER, 1994), la Pineta di San Vitale ricade nell'unità cartografica "1Dd" caratterizzata dalla presenza di suoli pianeggianti con pendenza variabile da 0,05 a 0,1%, molto profondi, a tessitura grossolana, calcarei moderatamente alcalini, salini e, localmente, a scarsa o buona disponibilità di ossigeno.

Più nel dettaglio, in seguito alle trasformazioni precedentemente descritte (paragrafo 3.2), il territorio della Pineta di San Vitale è caratterizzato dall'alternanza di dune e depressioni interdunali ad andamento circa parallelo alla linea di costa, formatisi a partire da circa 1000 anni fa (Bondesan *et al.*, 1995; Scossiroli, 1974). La differenza di quota tra le sommità dunali e le depressioni varia leggermente fino ad un massimo di 3 m, sia per l'apporto di materiali alluvionali ed eolici a livello delle depressioni, sia per il graduale abbassamento delle sommità nei secoli (Scossiroli, 1974).

Anche se dell'ordine di pochi metri, il sistema dunale è tale da influenzare in modo sostanziale la posizione della falda freatica rispetto alla superficie topografica: essa affiora nelle zone depresse mentre permane quasi sempre ad una profondità superiore ai 2 m rispetto al piano campagna in corrispondenza dei dossi. Riguardo alla tessitura, il substrato pedogenetico si presenta grossolano, con aspetti più fini nelle depressioni. L'acqua di falda presenta gradi di salinità assai variabili nelle diverse aree della pineta (Buscaroli & Zannoni, 2006).

In base alla Carta dei Suoli di Pianura della Regione Emilia-Romagna in scala 1:50000, restituita su C.T.R. 1:25000, risulta che la pineta ricade interamente nella delineazione n. 118, situata in ambiente di piana di sabbia costituito da depositi di duna e da depositi di cordone all'interno della quale sono presenti tre pedotipi: suoli San Vitale, suoli Cerba e suoli Pirottolo. Uno studio recente condotto da Buscaroli & Zannoni (2006) ha permesso di individuare la distribuzione e localizzazione dei pedotipi all'interno della Pineta, rappresentata in Fig. 3.8.

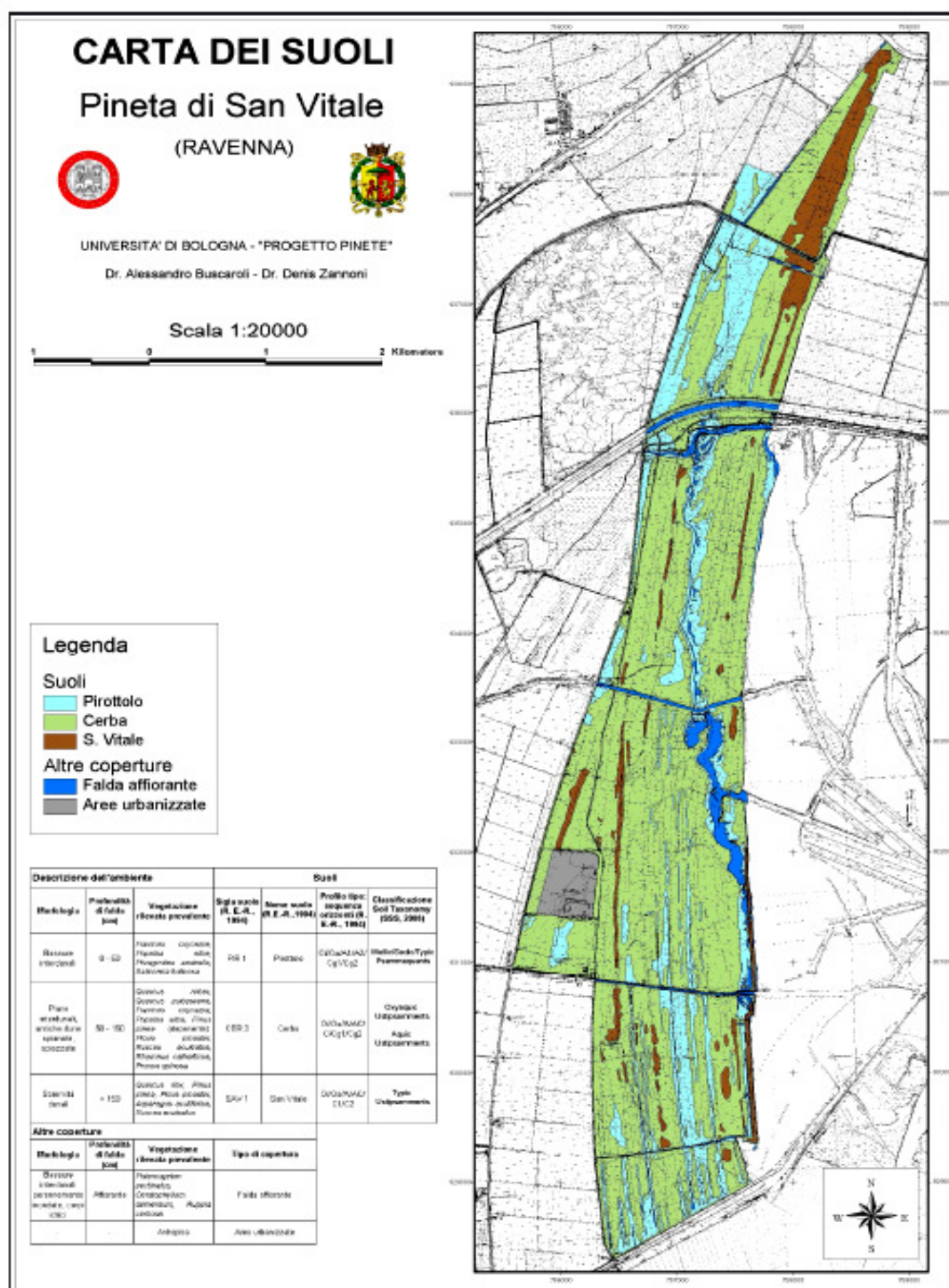


Fig. 3.8. Carta Pedologica della Pineta di San Vitale (Buscaroli & Zannoni, 2006).

I suoli **San Vitale**, presenti in corrispondenza delle sommità dunali (Fig. 3.9), sono molto profondi, ben drenati, prevalentemente a tessitura sabbiosa fine, da non calcarei a scarsamente calcarei nella parte superiore, moderatamente o molto calcarei in quella inferiore. Il pH si presenta da debolmente a moderatamente alcalino, la sostanza organica è presente in aliquote abbastanza elevate.

Il tipico profilo associato a questo tipo di suoli è composto, procedendo dall'alto verso il basso, dai seguenti orizzonti:

- orizzonte organico (O), caratterizzato dalla presenza di residui vegetali e animali;
- orizzonte organo-minerale (A), che contiene sostanza organica ed inorganica ;
- orizzonte di transizione tra l'orizzonte A e l'orizzonte C
- substrato pedogenetico (C), materiale da cui si è originato il suolo
- substrato pedogenetico a gley (Cg), con fenomeni di ossidoriduzione intensi associati all'influenza della vicina falda freatica.

Generalmente non vi è presenza di falda al di sopra dei 150 cm di profondità.

Sono classificati come *Calcaric Arenosols* o *Aridi Calcaric Arenosols* in base al WRB, World Reference Base for Soil Resources, (FAO-ISRIC-ISSS, 1998) e come *Typic Ustipsamments, mixed, calcareus, mesic* secondo la Soil Taxonomy (SSS, 2006).

I suoli **Cerba**, presenti alla base delle dune (Fig. 3.9), sono suoli molto profondi, con sottili strati organici superficiali; sono da molto scarsamente a moderatamente calcarei, a tessitura sabbiosa fine, il pH si presenta da neutro a moderatamente alcalino nella parte superiore e da moderatamente a fortemente alcalino in quella inferiore. La sostanza organica è presente limitatamente agli orizzonti superficiali.

Il profilo associato ai suoli Cerba presenta gli stessi orizzonti caratteristici dei suoli San Vitale, ma in genere dallo spessore ridotto, che risentono in diversa misura dell'influsso della falda, specialmente nei mesi con maggiori precipitazioni.

Sono classificati come *Calcaric Arenosols (Gleyic)* in base al WRB e come *Aquic Ustipsamments, mixed, mesic* secondo la Soil Taxonomy.

Infine, i suoli **Pirottolo**, nelle zone depresse con falda superficiale da affiorante a semi-affiorante (Fig. 3.9), sono suoli molto profondi, da molto scarsamente a moderatamente calcarei, con pH da neutro a moderatamente alcalino; da non salini a moderatamente salini; a tessitura sabbiosa fine franca o franca sabbiosa fine. Il contenuto di materia organica risulta notevole in superficie e tende gradualmente a diminuire passando agli orizzonti profondi.

Data la vicinanza della falda freatica alla superficie, rispetto ai due precedenti tipi di suolo, lo spessore dei diversi orizzonti risulta ulteriormente ridotto; il profilo tipico dei suoli Pirottolo inferiormente all'orizzonte A presenta direttamente l'orizzonte Cg e non l'orizzonte C. Infatti, sono suoli con proprietà gleyiche, che si presentano entro 50 cm dalla superficie. A livello di classificazione questi suoli sono definiti come *Calcaric Gleyic*

Arenosols in base al WRB e come *Typic Psammaquents, mixed, mesic* secondo la Soil Taxonomy.

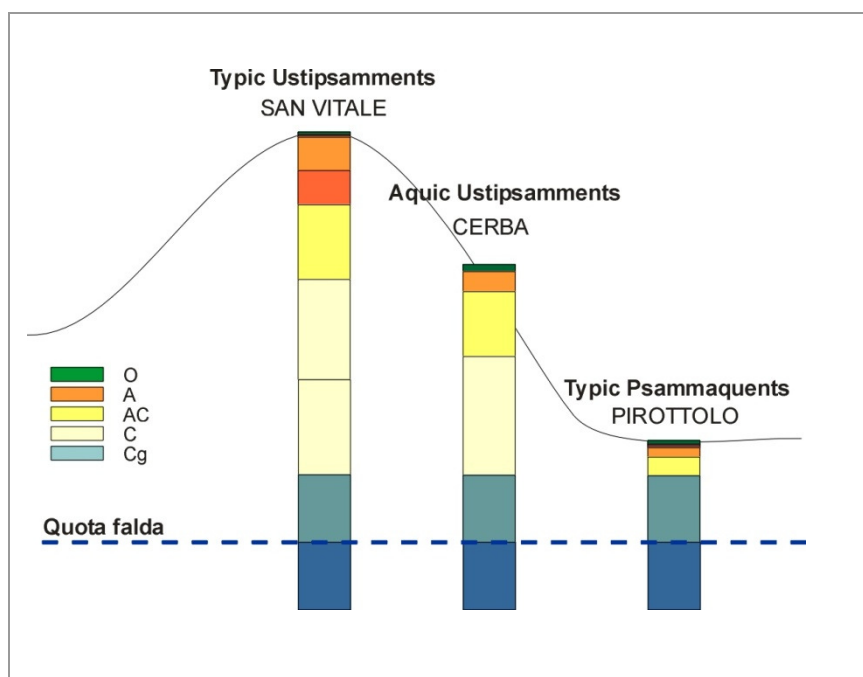


Fig. 3.9. Morfosequenza delle tipologie di suoli presenti nella Pineta di San Vitale, come indicate dalla Regione Emilia-Romagna (Buscaroli & Zannoni, 2006).

In linea con gli obbiettivi del presente lavoro, particolare attenzione è stata posta ai valori relativi alla salinità nei diversi pedotipi all'interno della pineta.

Da uno studio condotto da Buscaroli *et al.* (2007), relativo ai suoli e alla vegetazione della Pineta di San Vitale, emerge che in generale i suoli Pirottolo presentano un tenore medio di salinità decisamente maggiore che non negli altri due pedotipi, così come maggiore è la variazione della salinità, soprattutto nei primi 10 cm di profondità.

A volte si registra un aumento di salinità procedendo in profondità nel profilo, legato principalmente alla presenza di falda salmastra. Di contro, durante i periodi estivi, siccitosi, si registra sovente un incremento di salinità alla superficie del suolo. Tale incremento risulta tanto più evidente quanto più prossima alla superficie risulta essere la tavola d'acqua, e quanto maggiore è la sua salinità (Buscaroli e Zannoni, 2010). Oltre a ciò, è verosimile ipotizzare un contributo alla salinizzazione superficiale, conseguente alla deposizione di aerosol marino. Buscaroli *et al.* (2007) mettono in relazione, inoltre, i pedotipi presenti con la vegetazione osservata (Fig. 3.10).

Dallo studio risulta che i suoli San Vitale sono dominati da tipi di vegetazione xerotermofili, il cui principale rappresentante è costituito da *Pinus pinea*. A livello arboreo, trovano posto anche *Quercus pubescens* e *Quercus robur*, quest'ultimo sempre presente

ma in modo rado, *Quercus ilex* e *Fraxinus ornus*. Tra le specie arbustive, si ritrovano *Phyllirea angustifolia*, *Clematis flammula*, *Osyris alba*, *Teucrium chamaedrys* e *Colutea arborescens*, frammiste alla vegetazione arborea o a formare comunità arbustive vere e proprie, in situazioni pre-forestali o come sintomo di una situazione di degradazione del bosco.

Per i suoli Cerba, caratterizzati da un *range* di profondità della falda piuttosto ampio, si trova una caratterizzazione vegetazionale suddivisa tra suoli Cerba profondi (profondità della falda variabile da circa 80 cm a 150 cm di profondità) e suoli Cerba superficiali (profondità della falda variabile da circa 50 cm a 80 cm di profondità). I primi presentano un'elevata copertura a *Quercus robur*, mescolata anche ad alcuni esemplari di *Pinus pinea*; vi sono poi alcune specie indicatrici quali *Viola hirta* e *Buglossoides purpureocaerulea*. I suoli Cerba superficiali, data la vicinanza della falda freatica, presentano invece molte specie caratteristiche dei boschi igrofili, quali *Fraxinus oxycarpa*, *Populus alba* e *Ulmus minor*, mentre *Quercus robur* è ridotto a pochi individui o addirittura non presente. Nelle zone a maggiore copertura arborea, si osserva anche la comparsa di *Viburnum opulus* e *Alisma lanceolatum*; invece, dove la copertura arborea è minore, si ritrovano *Solanum dulcamara*, *Frangula alnus* e *Prunus spinosa*.

Infine, ai suoli Pirottolo sono associate comunità vegetali determinate dalla vicinanza della falda freatica alla superficie e dalla sua salinità. In tal modo si individuano suoli Pirottolo non salini, che presentano tutte specie tipiche dei boschi igrofili: *Ulmus minor*, a livello arboreo, *Prunus spinosa* e *Solanum dulcamara*, a livello arbustivo, sino al canneto dominato da *Phragmites australis*.

Invece, sui suoli Pirottolo salini si ritrovano specie tipiche della vegetazione alofita come *Juncus maritimus* e *Salicornia* gr. *Europea* (Buscaroli *et al.* 2007).

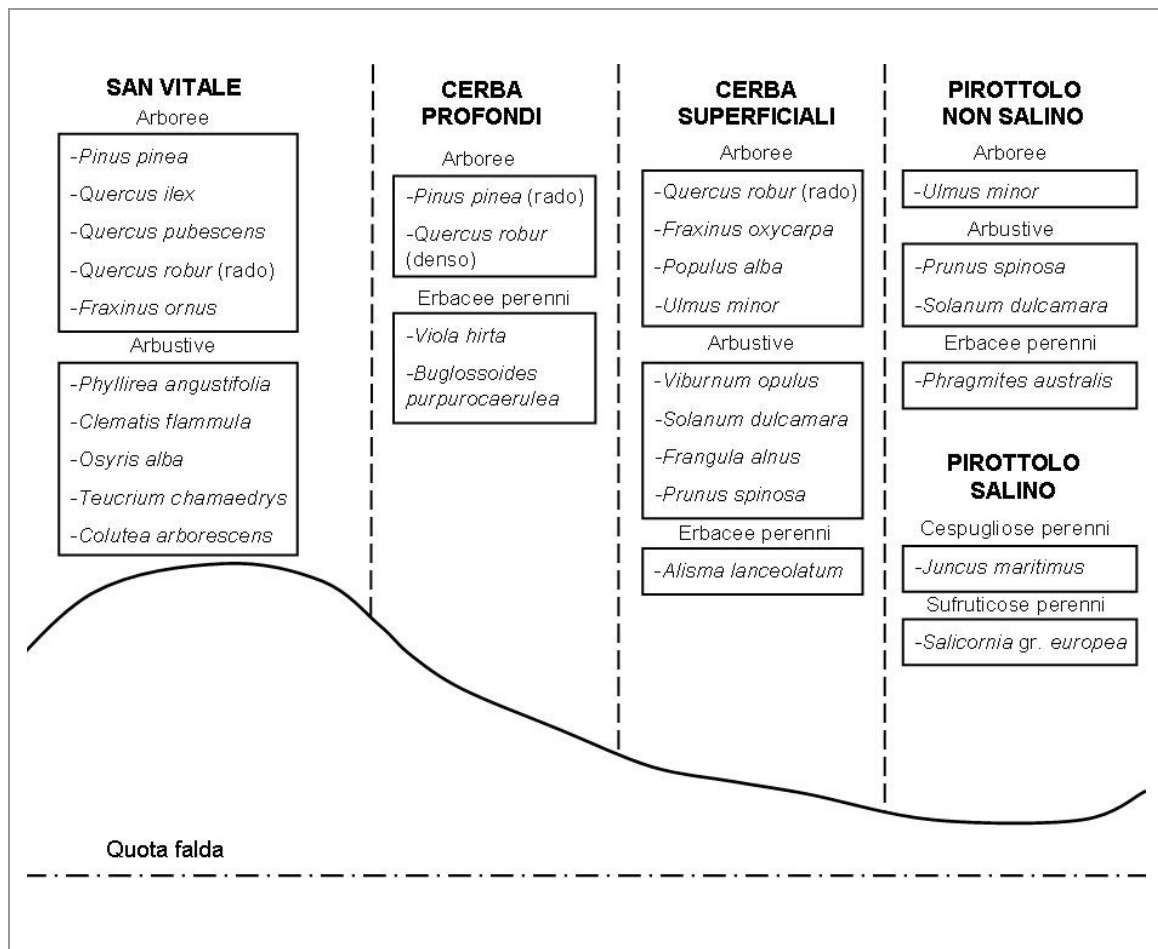


Fig. 3.10. Vegetazione più comune associata ai diversi pedotipi.

3.7 Gli habitat della pineta

Il bosco planiziale, su cui è stata imposta la specie *Pinus pinea*, costituendo così la pineta, appare allo stesso tempo igrofilo, mesofilo e xerofilo. Pertanto, al suo interno si possono individuare diverse associazioni vegetali, riassumibili al bosco misto con farnia (*Quercus robur*), roverella (*Quercus pubescens*) e orniello (*Fraxinus ornus*), accanto ad un bosco igrofilo con pioppo (*Populus alba*) e frassino (*Fraxinus excelsior*).

L'interazione di differenti fattori naturali e gli effetti della componente biotica, in particolare dell'uomo, hanno fatto sì che la Pineta di San Vitale presenti un complesso intreccio di habitat differenziati e mescolati tra loro, espressione della grande varietà di condizione ecologiche instauratesi.

Sulla base dello studio effettuato da Bassi (2004), si può effettuare una caratterizzazione dei principali habitat presenti all'interno della pineta, che risultano essere:

- **Habitat acquatico**, riconducibile alle zone umide perenni, come il Pirottolo e il Cavedone, e ai canali che attraversano la pineta. Per quanto riguarda la componente

vegetale è caratterizzato prevalentemente da popolamenti algali e da una modesta flora vascolare costituita sia da piante radicanti (presenza del genere *Ruppia*) che natanti (genere *Lemna*).

- **Habitat barenicolo**, corrispondente alle barene dei canali, periodicamente emerse, e alla fascia di raccordo tra la pineta e i margini della Piallassa. Presenta elevati valori di salinità e di umidità ambientale, la granulometria del substrato è prevalentemente argillosa. Tra le specie vegetali caratteristiche si ritrovano quelle appartenenti ai generi *Salicornia*, *Arthrocnemum*, *Halimione* e *Suaeda*, e le specie *Salsola soda* e *Chenopodium rubrum*, facenti parte della serie alofita delle *Chenopodiaceae*.
- **Habitat ripariale**, presente in corrispondenza degli argini stabili dei canali e delle zone umide interne al bosco, assume differenti valori di salinità, in genere più elevata rispetto ai terreni circostanti, così come varia l'umidità ambientale in relazione all'esposizione e alla copertura vegetale. La granulometria del substrato, spesso artificiale, è prevalentemente limosa anche se possono essere presenti sabbie e/o ghiaie. Dal punto di vista vegetazionale tale habitat presenta in genere le stesse specie del territorio circostante, quelle tipiche del bosco se l'argine ha una copertura arborea, oppure quelle delle radure xeriche se l'argine è scoperto. Solo in condizioni di elevata salinità, come ad esempio in prossimità della Piallassa e lungo l'argine meridionale del canale Taglio, si possono individuare delle specie caratteristiche riconducibili a *Tamarix gallica* sui suoli sabbiosi sciolti e debolmente salini e *Agropyron pungens* sui suoli salini.
- **Habitat igrofilo prossimale**, tipico dei margini delle zone umide perenni interne al bosco, con piano topografico compreso tra i livelli di escursione minima e massima della falda freatica. La salinità è media e l'umidità ambientale variabile. Il substrato, allagato in modo variabile durante l'anno, ma con frequenze stagionali regolari, presenta una granulometria prevalentemente di natura argillosa. Le specie vegetali caratteristiche sono riconducibili all'associazione erbacea igrofila dominata da *Juncus acutus*. Nelle zone interessate da interrimento, tende ad instaurarsi il canneto costituito da *Phragmites australis*.
- **Habitat igrofilo distale**, tipico dei margini delle zone umide perenni, interne al bosco, con piano topografico superiore al livello di escursione massima della falda freatica. Il substrato, perennemente emerso, presenta una granulometria prevalentemente limosa. È caratterizzato dalla presenza di specie vegetali di

raccordo tra la vegetazione erbacea prossimale, igrofila, e la retrostante vegetazione arbustiva. Sono tutte specie erbacee tra le quali *Althea officinalis*, *Lythrum salicaria*, *Centaureum erythraea*, *Galium palustre*, *Lycopus europaeus*, *Mentha acquatica* e molte appartenenti alla famiglia delle *Juncaceae*.

- **Habitat arbustivo di raccordo**, corrisponde alla fascia arbustiva che collega la vegetazione erbacea igrofila delle zone umide al bosco. L'umidità ambientale è medio-elevata e il suolo ha granulometria prevalentemente limosa. L'associazione caratteristica è contraddistinta dalla presenza di *Prunus spinosa* e *Pyrus piraster*.
- **Habitat del bosco igrofilo**, presente in corrispondenza delle paleo-depressioni interdunali. L'umidità ambientale è medio-elevata, il substrato, che in alcuni casi può subire sommersione a causa della risalita della falda freatica, presenta una granulometria limoso-argillosa. Da un punto di vista vegetazionale, per quest'habitat si distinguono tre livelli: arboreo, arbustivo ed erbaceo. Il livello arboreo è caratterizzato dalla presenza di due specie appartenenti al genere *Fraxinus*, che sono *Fraxinus excelsior* e *Fraxinus oxycarpa*, molte specie relative al genere *Salix*, *Populus alba* e *Ulmus minor*. Il livello arbustivo presenta tra l'altro delle specie lianose quali *Clematis viticella* e *Solanum dulcamara*, che prediligono la vicinanza di aree umide, come anche l'arbusto *Viburnum opulus*. Infine, il livello erbaceo può essere rappresentato da *Symphytum officinale*, *Iris pseudacorus* e *Carex elata*, anche se non esiste una vera associazione erbacea caratteristica del bosco umido presente in pineta.
- **Habitat del bosco misto**, tipico dei rilievi in corrispondenza delle paleodune, al di sopra dei livelli di escursione massima della falda. L'umidità ambientale può essere medio-bassa all'interno del bosco, oppure minima nelle radure aride. La granulometria del substrato è sabbiosa, alcune volte incoerente. Come per l'habitat del bosco igrofilo, anche in questo caso la vegetazione può essere suddivisa tra differenti livelli: ritroviamo quelli arboreo, arbustivo ed erbaceo assieme al livello lianoso, distinto da quello arbustivo per l'abbondanza di specie presenti. Procedendo dall'alto verso il basso, il livello arboreo è dominato dalla presenza di *Quercus robur* e di *Pinus pinea*; vi sono poi *Quercus pubescens*, maggiormente diffuso nel settore settentrionale del bosco, e *Quercus ilex*, spesso risultante da impianti artificiali ma anche soggetto ad una distribuzione spontanea laddove ci sia minore competizione con *Quercus robur*, ovvero nelle zone più aride della pineta. Il livello arbustivo presenta una grande ricchezza di specie suddivisibili in due

differenti fasce di altezza. Tra i 3 e i 5 m, ovvero la fascia più elevata del sottobosco, si possono ritrovare diverse specie caratteristiche tra le quali *Crataegus monogyna*, *Euonymus europaeus*, *Rhamnus catharticus* e *Cornus mas*. Invece, la fascia compresa tra i 2 e i 3 m di altezza è caratterizzata dalla presenza di *Ligustrum vulgare*, *Juniperus communis*, *Coronilla emerus*, *Berberis vulgaris*, *Pyracantha coccinea*, *Phillyrea angustifolia*. A quote comuni sia al livello arboreo che a quello arbustivo si sviluppa il livello lianoso, costituito da specie a fusto volubile che crescono sfruttando il sostegno sia di specie arboree anche ad altezze superiori ai 15 m, sia di specie presenti nella fascia arbustiva compresa tra i 2 e i 3 m. Le specie più vistose appartenenti a questo livello sono *Hedera helix* e *Clematis vitalba*. Tra le specie sarmentose si ritrovano le rose come *Rosa canina* e *Rosa sempervirens*, i rovi, rappresentati da *Rubus ulmifolius* e *Rubus caesius*, due specie appartenenti al genere *Lonicera*, *Lonicera caprifolium* e, sebbene più rara, *Lonicera etrusca*. Infine si segnala la presenza di *Vitis vinifera* specie che assume sia aspetto rampicante che prostrato. In prossimità del substrato si ritrova infine il livello erbaceo che presenta il maggior numero di specie presenti in pineta. Osservando separatamente le zone fresche e ombrose interne al bosco e le zone aride e soleggiate in corrispondenza delle radure, si possono elencare alcune specie caratteristiche: alle prime appartengono specie quali *Alliaria petiolata*, *Buglossoides purpureocaerulea*, *Campanula rapunculus*, *Centaurea nigrescens*, *Prunella vulgaris*, *Teucrium chamaedrys* e *Viola hirta*; in corrispondenza delle radure, tra le tante specie presenti, si ritrovano *Anthemis arvensis*, *Calamintha nepeta*, diverse specie appartenenti ai generi *Caryophyllaceae* e *Cruciferae*, *Diplotaxis tenuifolia*, *Geranium rotundifolium*, *Hypericum perforatum*, *Oenothera biennis* e *Ranunculus acris*.

3.8 La pedofauna

In base allo studio di Scossioli (1974) sulla pedofauna, in relazione agli effetti dell'inquinamento provocato dagli insediamenti industriali limitrofi alla Pineta di San Vitale, emerge che la componente biologica del suolo è dominata da Acari e Collemboli, che presentano una distribuzione aggregata, di tipo contagioso.

Pertanto, tale studio ha considerato tali organismi per l'indagine del popolamento della pedofauna nella Pineta.

Per quanto riguarda le variazioni sistematiche riscontrate all'interno di questi due gruppi, nonostante siano state reperite numerose specie per entrambi, solo poche si sono dimostrate predominanti. Questa caratteristica è stata correlata al peggioramento delle condizioni ambientali della zona, dovute all'inquinamento atmosferico provocato dagli impianti industriali presenti vicino al confine meridionale della pineta.

Tuttavia, soprattutto per l'assenza di dati bibliografici di confronto su ambienti simili, l'indagine effettuata da Scossiroli non ha portato a conclusioni significative.

Dal punto di vista quantitativo, sebbene non ci siano prove determinanti, è stata rilevata una maggiore tendenza a subire notevoli variazioni nella frequenza media degli Acari rispetto ai Collemboli. Tali fluttuazioni numeriche sono state certamente dovute a diversi fattori dipendenti sia dal tempo di prelievo, come ad esempio variazioni del ciclo riproduttivo delle specie appartenenti ai due gruppi, sia dalla collocazione e relative condizioni di microambiente (caratteristiche chimico-fisiche del suolo, livello della falda, tipo di copertura vegetale e quindi tipo di lettiera, ecc.).

In generale, lo studio degli indici di diversità ha evidenziato una condizione di disagio per alcune comunità di organismi confermando sicuramente effetti negativi sull'ecosistema della Pineta associati all'inquinamento atmosferico da scarichi industriali, sebbene non sia in grado di rilevare un effetto apprezzabile. La ricerca ecologica svolta ha sottolineato un'influenza limitata e comunque localizzata delle ricadute di inquinanti dall'atmosfera, dovute alla presenza degli impianti industriali.

Molto più rilevanti invece sembrano essere le caratteristiche del sottosuolo ed in particolare gli effetti dell'inquinamento della falda freatica superficiale dovuto a cloruri e a prodotti della degradazione anaerobica della sostanza organica.

4. Materiali e metodi

4.1 Disegno di campionamento

4.1.1 Base dati

Il disegno di campionamento è stato condotto sulla base dei risultati di studi in precedenza riportati (Buscaroli & Zannoni, 2006; Antonellini *et al.*, 2008), si veda il capitolo 3, paragrafi 3.5 e 3.6.

In particolare, sono state utilizzate la Carta dei suoli della Pineta di San Vitale, in scala 1:20000 (Buscaroli & Zannoni, 2006), per ottenere un'indicazione sulla distribuzione dei tre tipi di suolo, e le carte "Surface salinity map, autumn 2004" e "Surface salinity map, spring 2005" (Antonellini *et al.*, 2008), per definire l'epoca di campionamento.

Inoltre, sono state utilizzate delle immagini satellitari della zona (Google Earth) inserite nel sistema WGS84, coordinate UTM 33.

I sopralluoghi preliminari e definitivi sono stati eseguiti utilizzando un ricevitore GPS che ha permesso di identificare in maniera puntuale i siti di osservazione e campionamento.

4.1.2 Individuazione dei siti di campionamento

L'area di studio, in cui sono stati individuati i siti di campionamento è costituita dall'intera Pineta S. Vitale, ad esclusione del lembo più settentrionale, separato dal resto della pineta dal fiume Lamone.

L'area è stata suddivisa in due zone: zona est, più verso il mare, caratterizzata, secondo gli studi precedenti già citati, da valori di salinità maggiori nel suolo, nell'acqua superficiale e nell'acqua di falda, e zona ovest, più interna, meno salata. Sempre secondo le informazioni disponibili, la differenza di salinità è accentuata nel periodo estivo e si riduce di molto nelle altre stagioni.

All'interno di tali zone sono stati definiti sei transetti, in modo tale da avere una copertura il più possibile rappresentativa e complessiva dell'intera pineta. I transetti, tre per ogni zona, sono stati collocati uno a nord, uno al centro e uno a sud all'interno delle stesse, ovvero, procedendo da nord verso sud, transetti 4, 5, 6 nella zona est e transetti 3, 2, 1 nella zona ovest (Fig. 4.1).

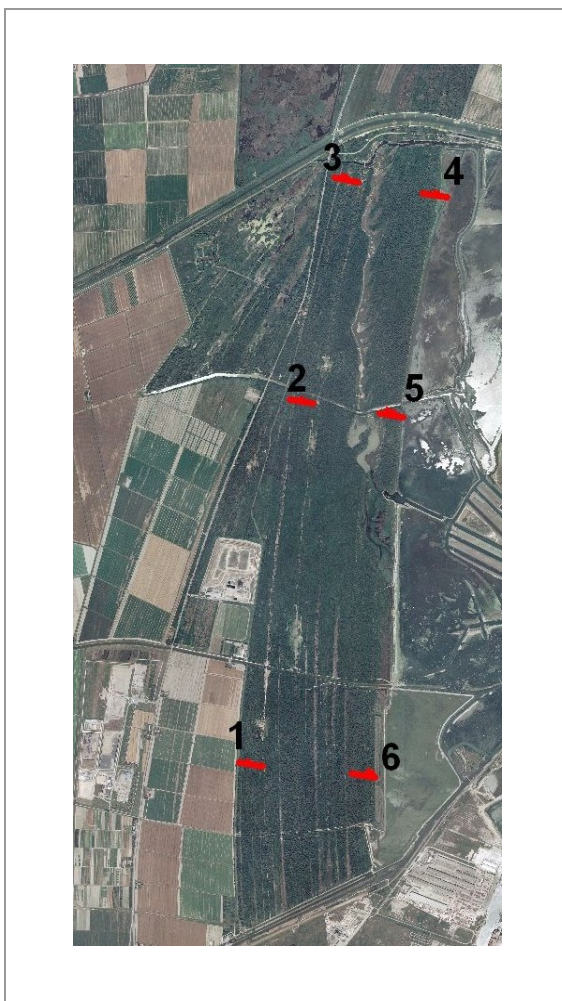


Fig. 4.1. Posizione dei transetti all'interno della Pineta di San Vitale (Google Earth, modificata).

Ogni transetto corrisponde ad una linea immaginaria che unisce due punti: il primo punto è rappresentato dalla sommità di una paleoduna; il secondo, a quota inferiore, è posto sul fondo di paleo-depressione interdunale.

Perciò, l'andamento dei transetti è risultato essere in direzione ovest-est con orientamento circa perpendicolare rispetto alla linea di costa, sebbene spesso non sia perfettamente lineare. In tal modo, i transetti attraversano perpendicolarmente i sistemi paleodunali e le paleo-depressioni interdunali.

Inoltre, la scelta dei transetti è stata effettuata in modo che ci fosse una chiara differenza di elevazione tra i due punti estremi e che la pendenza tra questi variasse in modo abbastanza regolare, senza incorrere in contropendenze e depressioni o sommità secondarie. Per quanto possibile si è anche evitato che la linea del transetto attraversasse uno dei numerosi sentieri e carrarecce che percorrono la pineta.

Come conseguenza di tali intenzioni, la lunghezza dei transetti è risultata essere piuttosto variabile, compresa tra un minimo di 19 m ed un massimo di 71 m (Tab. 4.1).

Un'altra conseguenza, associata alle suddette considerazioni ma legata anche alla necessità di arrivare in prossimità dei punti di campionamento con gli automezzi, è stata quella di ottenere l'allineamento tra coppie di transetti posizionati all'interno di ciascuna zona, a nord, centro e sud delle stesse (Fig. 4.1).

Dopo aver individuato i transetti, all'interno di ciascuno di questi, sono state definite le tre stazioni di campionamento in relazione ai tre tipi di suolo; due posizionate agli estremi dello stesso, in corrispondenza della sommità della duna (suolo San Vitale) e della depressione interdunale (suolo Pirottolo), ed una in posizione intermedia, in corrispondenza del suolo Cerba.

All'interno di ciascun transetto, l'orientamento dei tre tipi di suolo non è risultato essere sempre lo stesso: in alcuni casi la stazione Pirottolo è a est della rispettiva stazione S. Vitale, quindi il Pirottolo è più vicino alla Piallassa, in altri casi accade il contrario, con la stazione San Vitale a minore distanza dalla Piallassa rispetto alle altre due stazioni.

Volendo dare un inquadramento generale dell'ambiente che caratterizza i transetti e le relative stazioni di campionamento, facendo riferimento alla Carta della vegetazione del Parco Regionale del Delta del Po, Stazione Pineta di San Vitale e Piallasse di Ravenna (Piccoli *et al.*, 1999), risulta che nel loro insieme i sei transetti sono riconducibili a tre classi vegetazionali principali e cioè: boschi termofili di caducifoglie, boschi termofili submediterranei a querce sempreverdi e vegetazione arbustiva (Tab. 4.1).

Più nel dettaglio, si osserva una certa omogeneità all'interno delle due zone, ovvero tra i transetti 1, 2, 3, della zona ovest, per i quali risulta un ambiente caratterizzato dal bosco termofilo di caducifoglie, e tra i transetti 4, 5, 6, della zona est, dominati dalla presenza della vegetazione arbustiva, tranne due siti di campionamento, San Vitale e Cerba, del transetto 5 che rientrano all'interno della classe boschi termofili submediterranei a querce sempreverdi.

Come espresso dalla legenda allegata alla Carta della vegetazione, per boschi termofili di caducifoglie si intendono boschi termofili a prevalenza di farnia (*Quercus robur*) e roverella (*Quercus pubescens*), accompagnate da specie termofile e specie mesofile, soggetti ad antichi rimboschimenti a pino da pinoli (*Pinus pinea*) e prevalentemente diffusi nel settore meridionale del territorio; per boschi termofili submediterranei a querce sempreverdi si fa riferimento a macchie e boschi di sempreverdi xerofili, dominati dal leccio (*Quercus ilex*) e caratterizzati da *Phillyrea angustifolia*, *Asparagus acutifolius*, *Clematis flammula*, *Rubia peregrina*, *Ruscus aculeatus*, *Osyris alba* e *Rosa sempervirens*, miste a specie mesofile, sono comunità a carattere relitto ed impoverito di specie

mediterranee, residuo di boschi un tempo ben più estesi. Infine, la vegetazione arbustiva è riferita ad arbusteti, siepi e macchie con *Prunus spinosa*, *Crataegus monogyna*, *Ligustrum vulgare*, *Cornus sanguinea*, *Coronilla emerus*, *Rhamnus catharticus*, *Rubus* sp.pl., *Rosa* sp.pl., *Euonymus europaeus*, fitocenosi abbastanza evolute che precedono dinamicamente i boschi o che ne rappresentano stadi di degradazione.

In relazione a quanto osservato durante il campionamento, è emerso che l'ambiente reale che caratterizza i transetti presenta le specie indicatrici delle tre classi vegetazionali definite dalla Carta della Vegetazione. Tuttavia, a causa della grande varietà delle condizioni ecologiche che caratterizzano la pineta, tali specie appaiono mescolate tra loro a creare un complesso intreccio delle tre classi di vegetazione, che non presentano pertanto una distribuzione netta, conforme a quella definita dalla carta. In particolare, alcune specie sono osservabili in tutti i transetti campionati; tra queste ritroviamo *Pinus pinea*, in corrispondenza delle stazioni San Vitale, e *Ruscus aculeatus*, distribuito un po' ovunque, non associato ad una specifica stazione.

Tab. 4.1. Tabella riassuntiva delle principali caratteristiche dei siti di campionamento. Per la definizione del tipo di vegetazione si è fatto riferimento alla Carta della vegetazione del Parco Regionale del Delta del Po, Stazione Pineta di San Vitale e Piallasse di Ravenna (Piccoli *et al.*, 1999).

Zona	Transetto	Lunghezza (m)	Stazioni di Raccolta	Coordinata WGS 84 - UTM 33		Tipo di Vegetazione
				Est (m)	Ovest (m)	
Ovest	1 (sud)	19	San Vitale	279031	4928381	Boschi termofili di caducifoglie
			Cerba	279040	4928379	Boschi termofili di caducifoglie
			Pirottolo	279049	4928375	Boschi termofili di caducifoglie
	2 (centro)	22	San Vitale	279529	4931804	Boschi termofili di caducifoglie
			Cerba	279539	4931804	Boschi termofili di caducifoglie
			Pirottolo	279552	4931802	Boschi termofili di caducifoglie
	3 (nord)	49	San Vitale	279967	4933910	Boschi termofili di caducifoglie
			Cerba	279920	4933921	Boschi termofili di caducifoglie
			Pirottolo	279955	4933910	Boschi termofili di caducifoglie
Est	4 (nord)	36	San Vitale	280823	4933753	Vegetazione arbustiva
			Cerba	280795	4933756	Vegetazione arbustiva
			Pirottolo	280788	4933761	Vegetazione arbustiva
	5 (centro)	71	San Vitale	280383	4931687	Boschi termofili submediterranei a querce sempreverdi
			Cerba	280413	4931685	Boschi termofili submediterranei a querce sempreverdi
			Pirottolo	280345	4931704	Vegetazione arbustiva
	6 (sud)	48	San Vitale	280208	4928272	Vegetazione arbustiva
			Cerba	280162	4928288	Vegetazione arbustiva
			Pirottolo	280181	4928274	Vegetazione arbustiva

Come mostrato nella Fig. 4.2, in ognuna delle tre stazioni (San Vitale, Cerba e Pirottolo) sono stati posizionati tre punti di campionamento disposti lungo la perpendicolare rispetto alla linea del transetto, garantita attraverso l'eventuale rimozione di porzioni di vegetazione motivo d'intralcio. In corrispondenza di ogni punto è stato prelevato un campione di suolo, secondo le modalità descritte al paragrafo 4.2.1, in modo da avere un campione centrale (B) in corrispondenza della linea del transetto e due campioni laterali (A, C). Questi ultimi sono stati posizionati alla distanza di 5 m da quello centrale, distanza determinata tramite l'ausilio di una cordella metrica.

In tal modo sono stati ottenuti nove campioni per ciascun transetto, suddivisi a gruppi di tre per ogni tipo di suolo, per un totale di cinquantaquattro campioni.

Particolare attenzione è stata posta ai siti di campionamento, infatti, questi dovevano essere il più possibile inalterati, non sottoposti a calpestio. Si è anche evitato di disturbare i punti di raccolta dei campioni durante il posizionamento e durante le operazioni necessarie a rendere raggiungibili le posizioni scelte.

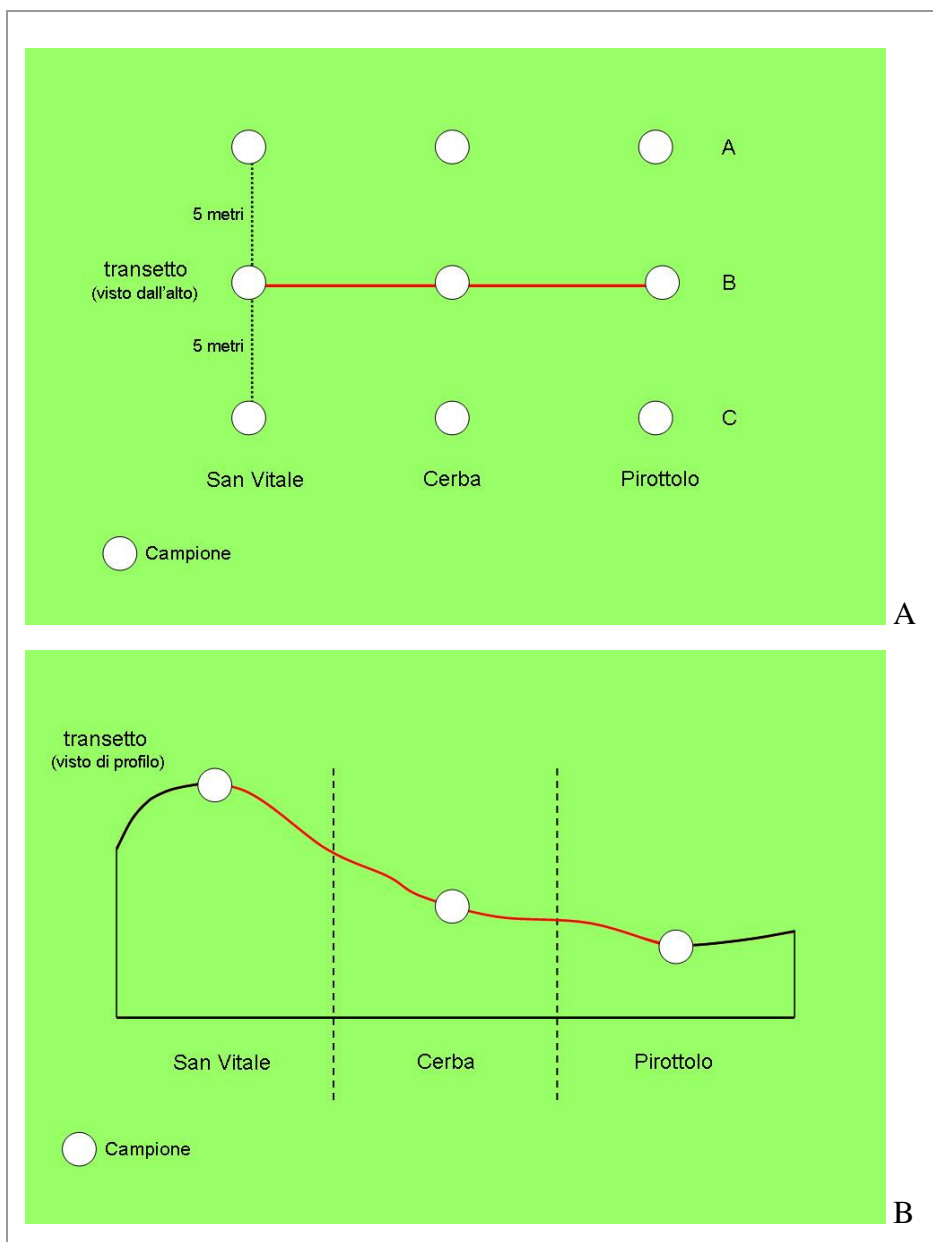


Fig. 4.2. Schema del campionamento; vista dall'alto (A) e vista di profilo (B).

4.1.3 Periodi di campionamento

Tutti i punti di campionamento, sono stati campionati in due occasioni. La prima nel periodo primaverile, la seconda nel periodo estivo. Nel presente lavoro sono riportati solo i risultati del periodo primaverile. La scelta di condurre un duplice campionamento è stata effettuata al fine di monitorare l'andamento della pedofauna in termini di varietà e di numerosità degli individui, in relazione alla supposta variazione della salinità dei suoli in tali periodi, in seguito alle conoscenze apprese dagli studi pregressi (Buscaroli & Zannoni , 2006; Antonellini *et al.*, 2008).

Mentre il periodo estivo è quello in cui è più probabile evidenziare uno stress dovuto alla salinizzazione sul popolamento edafico, ci si aspettava che il periodo primaverile fosse caratterizzato da un popolamento ben sviluppato in tutte le stazioni campionate, a causa della salinità più bassa in concomitanza con temperature miti.

Il campionamento primaverile è stato compiuto nella prima settimana del mese di maggio 2010, avendo cura di effettuarlo nel più breve tempo possibile per garantire omogeneità riguardo alle condizioni di raccolta dei campioni.

4.2 Modalità di raccolta dei campioni

4.2.1 Campionamento degli invertebrati del suolo

Tenendo in considerazione quanto appreso dalla consultazione del manuale da campo per l'applicazione del metodo QBS-ar (Codurri *et al.*, 2005), ogni campione è stato il risultato dell'unione di tre carote di suolo, ottenute utilizzando come strumento di raccolta un piantabulbi del diametro di 6 cm, inserito nel terreno per tutta la sua lunghezza, sino alla posizione dell'impugnatura (Fig. 4.3, B-C), arrivando così ad una profondità di 15 cm ottenendo una carota di suolo del volume pari a circa 424 cm³.

Al fine di evitare contaminazioni tra campioni si è provveduto alla pulizia del piantabulbi e al cambio dei guanti dopo ogni singola raccolta.

Le tre carote di suolo sono state raccolte in modo da costituire i vertici di un ipotetico triangolo equilatero i cui lati siano lunghi circa 15 cm (Fig. 4.3, D).

In presenza di lettiera, si è provveduto alla sua raccolta assieme al campione e non in modo separato da questo, come invece indicato dal manuale (Codurri *et al.*, 2005), al fine di evitare possibili fattori di stress per gli organismi animali presenti.

In presenza di copertura erbacea, questa è stata asportata con l'uso di forbici avendo cura di non alterare la lettiera ed il suolo sottostanti.

I tre sottocampioni così raccolti sono stati riposti delicatamente in un sacchetto di plastica, delle dimensioni di 35 cm in larghezza e 50 cm in altezza, avendo cura di mantenere una riserva d'aria e di conservarli in un luogo ombroso, al fine di mantenere l'integrità degli organismi animali sino al momento del trattamento dei campioni (Fig. 4.3, E).

Al fine del riconoscimento dei campioni, su ogni sacchetto è stato indicato: il luogo d'interesse, il codice identificativo del singolo campione, la stazione di raccolta e la data di campionamento. Tali annotazioni sono state riportate anche su un'etichetta inserita all'interno del sacchetto.

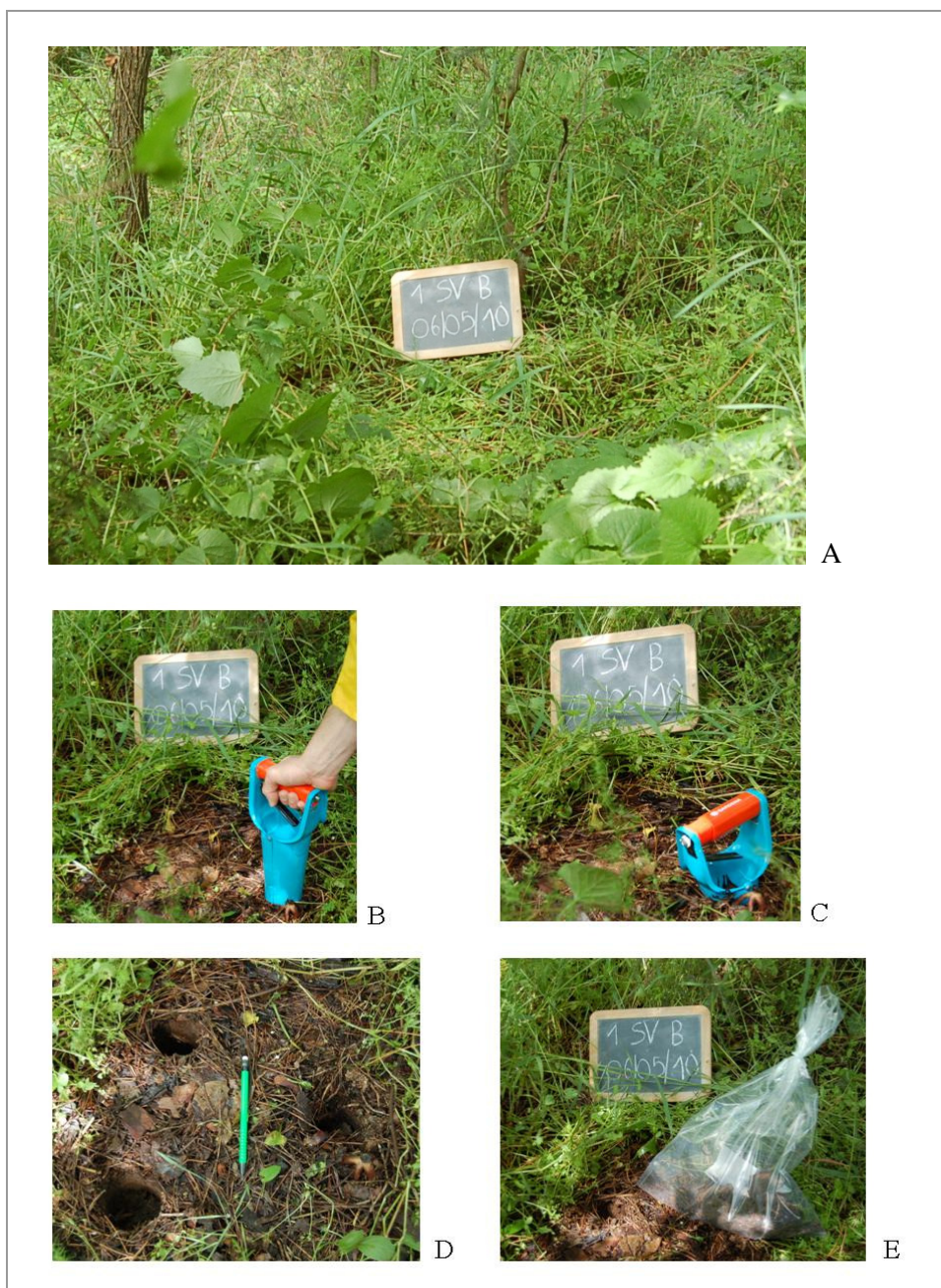


Fig. 4.3. Il campionamento per l'applicazione del metodo QBS-ar; la stazione di raccolta(A); lo strumento utilizzato per la raccolta (B); il prelievo della carota di suolo (C); la posizione delle tre carote di suolo preleviate (D); il campione finale (E).

4.2.2 Campionamento per le analisi chimiche

Contemporaneamente alla raccolta dei campioni per l'esame dei microartropodi, negli stessi siti sono stati prelevati i campioni dell'orizzonte superficiale del suolo (orizzonte A) sui quali effettuare in seguito le analisi di: CE, pH, contenuto d'acqua (%), sabbia (g/kg), limo (g/kg), argilla (g/kg), carbonio organico totale (TOC, g/kg), azoto totale Kjeldahl (NTK, g/kg) e il rapporto tra il contenuto di carbonio rispetto a quello dell'azoto (C/N).

Tali campioni, del peso di circa 500 g ciascuno, sono stati prelevati con l'ausilio di una paletta e riposti in sacchetti di plastica opportunamente contraddistinti dalle indicazioni riguardanti la stazione, la data di raccolta e la sigla dello specifico campione.

Il prelievo ha riguardato i primi 10-15 cm di suolo, avendo cura di rimuovere lo strato di lettiera sovrastante eventualmente presente.

Al fine di evitare contaminazioni tra campioni si è provveduto alla pulizia della paletta dopo ogni singola raccolta.

In corrispondenza del punto B di ogni stazione, oltre ai campioni superficiali appena descritti, sono stati raccolti dei campioni di suolo a profondità progressivamente crescente e fino alla falda freatica, con lo scopo di determinare l'andamento della CE e del pH lungo i profili dei tre tipi di suolo posti lungo i transetti.

Il prelievo è stato effettuato tramite l'uso di una trivella ed i campioni di suolo così estratti sono stati poi adagiati su un supporto in plastica della lunghezza di 2 m, opportunamente graduato (Fig. 4.4).

In tal modo, con l'ausilio di una piccola cazzuola regolarmente pulita, sono stati collezionati i campioni degli orizzonti presenti nei tre tipi di suolo per tutti i transetti, sino al livello della falda acquifera o comunque sino alla profondità massima di 200 cm.

Come per i campioni di suolo degli orizzonti superficiali, anche in questo caso si è provveduto alla loro raccolta in sacchetti di plastica sui quali erano indicati, oltre alla stazione, alla data di raccolta e alla sigla dello specifico campione, anche il nome del profilo e la profondità dell'orizzonte.

Sui campioni così raccolti sono state effettuate in seguito le misure della CE e del pH.

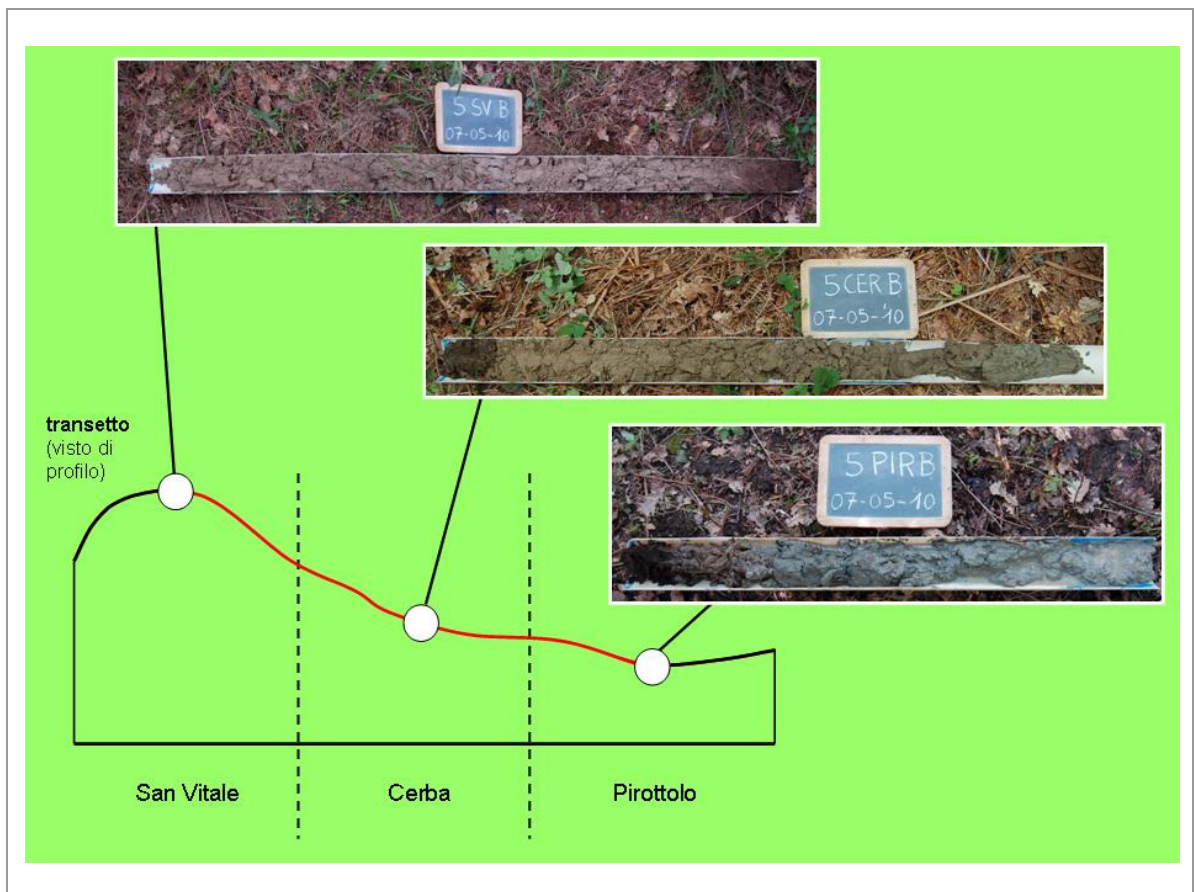


Fig. 4.4. Carote di suolo relative ai suoli San Vitale, Cerba e Pirottolo, presenti nelle tre stazioni lungo ciascun transetto (nello specifico sono mostrate quelle relative al transetto 5).

Durante la raccolta dei campioni, in corrispondenza del punto B, sono stati osservati gli orizzonti superficiali dei siti indagati (Fig. 4.5), onde cercare di inquadrare le forme di humus presenti.



Fig. 4.5. Orizzonti superficiali relativi ai suoli San Vitale, Cerba e Pirottolo in corrispondenza dei siti B dei sei transetti indagati.

4.3 Riconoscimento delle forme di humus

Il riconoscimento delle forme di humus caratteristiche dei siti indagati è avvenuto utilizzando un documento di recente pubblicazione (Zanella *et al.*, 2011). Questo, si presenta come un “*work in progress*” per cui, oltre al fatto che il livello di inquadramento tassonomico è diverso per le varie forme di humus, viene segnalato come, alcune di queste, debbano essere ulteriormente studiate e come altre, probabilmente, siano ancora sconosciute. Ciò nonostante, appare utile il tentativo di inquadrare i siti studiati anche per questo aspetto.

La base di referenziazione delle forme di humus utilizzata (Zanella *et al.*, 2011), individua in un primo livello la distinzione tra forme di humus terrestri e forme semi-terrestri. Questa divisione (gruppi principali) si basa sul fatto che le forme di humus possono originarsi sia in ambiente terrestre, sia in ambiente interessato da acque stagnanti o comunque soggetto a periodiche sommersioni, più o meno prolungate (Fig. 4.6).

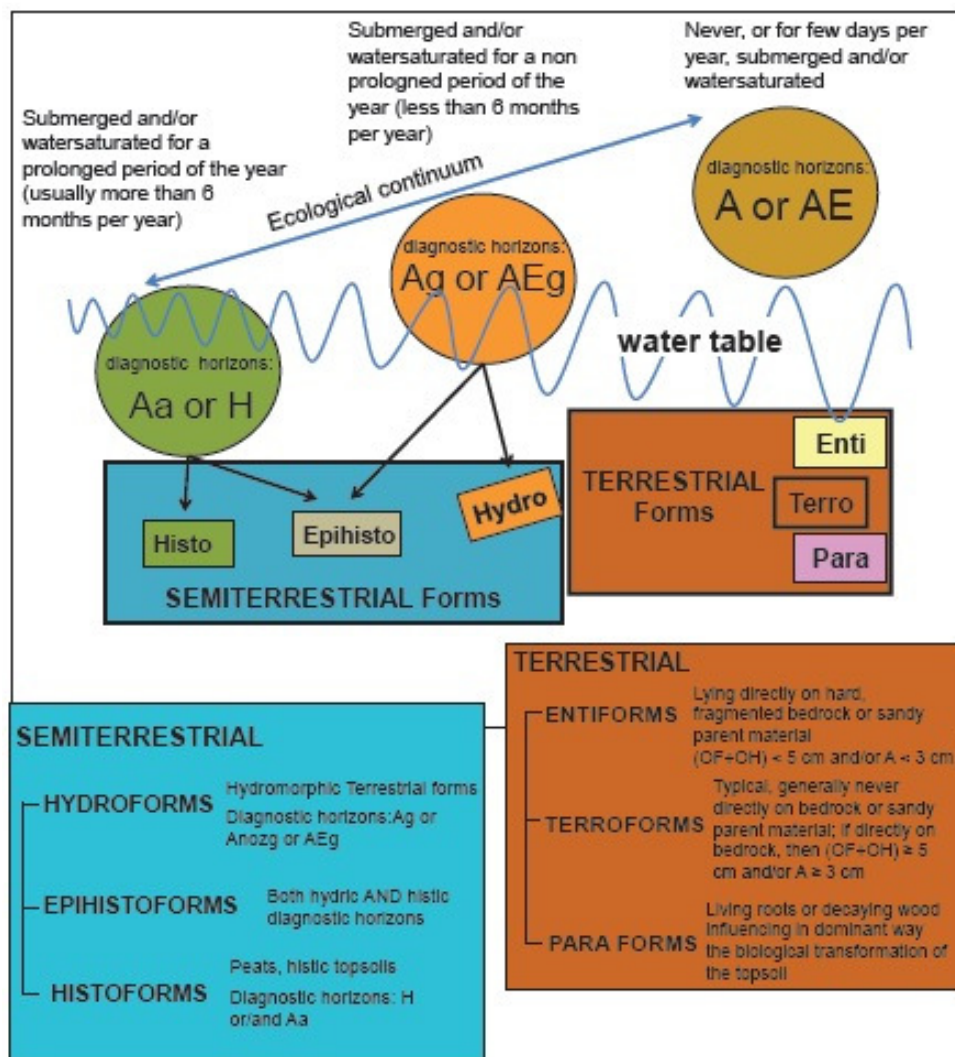


Fig. 4.6. Forme di humus in relazione alla presenza della falda (da Zanella *et al.* 2011).

In seno a questa prima distinzione viene individuato un secondo livello gerarchico (gruppi secondari) in cui sono descritte forme di humus tipiche, atipiche ed intermedie, sulla base di specifiche caratteristiche distintive. Un ulteriore livello distintivo individua, all'interno dei gruppi secondati, dei tipi biologici di humus che, per le forme *TERRO*- ed *HISTO*-, quelle tipiche e rappresentative, vengono ulteriormente caratterizzate e classificate (Fig. 4.7).

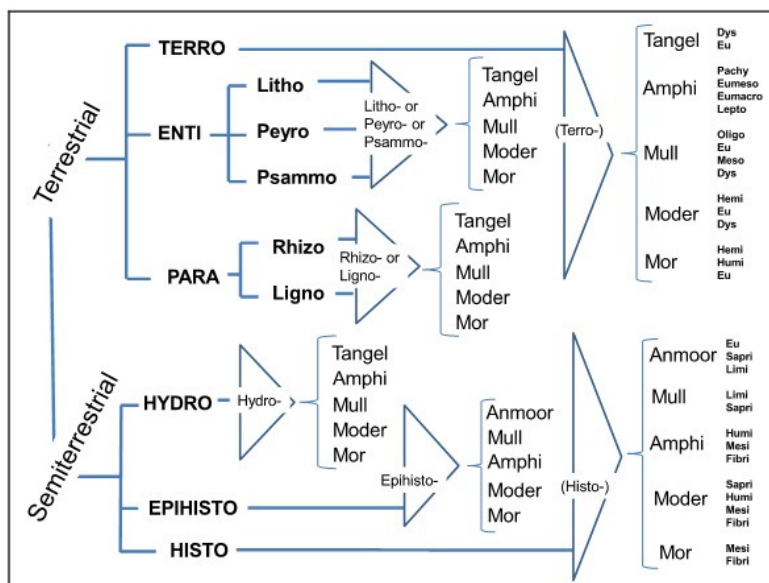


Fig. 4.7. Schema gerarchico previsto dalla tassonomia delle forme di humus (da Zanella *et al.* 2011).

L'attribuzione ad una specifica forma di humus avviene sulla base dell'identificazione di specifici orizzonti diagnostici.

4.4 Trattamento dei campioni

4.4.1 Trattamento dei campioni per l'estrazione degli invertebrati e per l'applicazione del metodo QBS-ar

Come per il campionamento, anche in questa fase del lavoro si è fatto riferimento al manuale da campo per l'applicazione del metodo QBS-ar (Codurri *et al.*, 2005).

I campioni raccolti sono stati trasportati in laboratorio, dove si è proceduto alla misura del loro peso (peso fresco).

In base al metodo del selettore di Berlese-Tullgren, ogni campione è stato collocato all'interno di un imbuto avente il diametro di 26,5 cm, sopra una reticella a maglie di 2 mm circa, in modo omogeneo, avendo cura di frantumare eventuali aggregati di terreno che avrebbero potuto costituire dei microambienti di rifugio per la pedofauna (Fig. 4.8 A-B). Inoltre, per evitare possibili allontanamenti degli organismi animali, è stata posizionata, sopra l'imbuto, una barriera cilindrica in plexiglass.

Al di sotto dell'imbuto è stato collocato un recipiente di raccolta riempito per la metà del suo volume con alcool all'80%.

Il tutto è stato posto sotto una lampada da 40 W, posta a circa 20 cm di distanza, con lo scopo di provocare l'allontanamento degli organismi animali dalla superficie, in relazione al fatto che questi tendono a fuggire dalla luce, dal calore e dall'essiccazione prodotti dalla

lampada e a rifugiarsi nell'ambiente buio, umido e fresco della parte più bassa del campione. In tal modo è stato favorito il loro spostamento verso il basso, in direzione del collo dell'imbuto, fino a cadere nel recipiente, venendo così fissati (Fig. 4.8 C).



Fig. 4.8. Fase di preparazione (A, B) e di estrazione (C). Nello specifico, per la fase di preparazione sono mostrati il posizionamento del campione (A) e la frantumazione degli aggregati di maggiori dimensioni (B).

L'estrazione ha avuto una durata totale di quattordici giorni, tuttavia, dopo i primi sette giorni si è provveduto alla sostituzione del contenitore di raccolta con uno nuovo per valutare lo stato del processo di estrazione. Inoltre, tramite un controllo giornaliero, si è provveduto all'aggiunta di alcool all'80% quando necessario.

Infine, sono state effettuate delle ulteriori sostituzioni dei contenitori che presentavano significative quantità di suolo o lettiera caduti accidentalmente attraverso l'imbuto, per evitare la perdita, il danneggiamento o l'essiccazione della selezione.

4.4.2 Trattamento preliminare dei campioni per le analisi chimiche

I campioni di suolo, una volta portati in laboratorio, sono stati seccati all'aria ponendoli a gruppi di tre in vaschette di plastica, adagiati sopra dei fogli di carta.

Dopo circa dieci giorni, e comunque solo quando il terreno risultava totalmente secco, i campioni sono stati setacciati con setaccio ASTM a maglia da 2 mm di diametro per ottenere la cosiddetta "terra fine".

Sulla terra fine si sono poi eseguite le analisi chimiche.

4.5 Riconoscimento degli invertebrati al microscopio

Successivamente alla preparazione dei campioni, è stato realizzato il riconoscimento dei microartropodi (Fig. 4.9) ovvero la loro identificazione e successivo smistamento in base alla classificazione definita dal metodo QBS-ar, secondo la quale gli organismi vengono identificati per grandi gruppi, a livello di phylum, classe o, al massimo, ordine. Sono stati identificati, sempre a livello di grossi taxa, anche gli invertebrati non appartenenti al phylum Arthropoda e quindi non utilizzati per l'applicazione del QBS-ar.

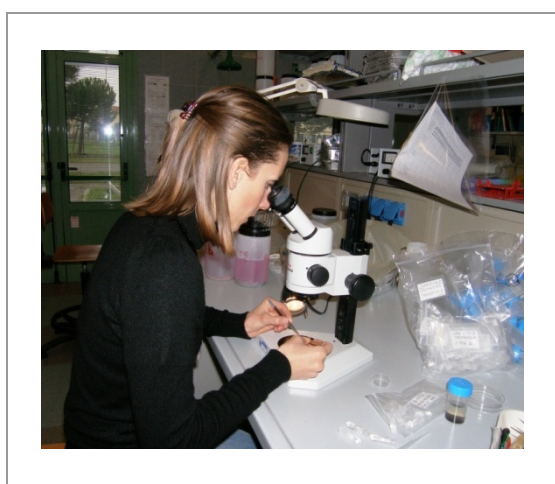


Fig. 4.9. Fase di riconoscimento dei microartropodi.

Per tale scopo, è stato utilizzato uno stereoscopio a 40 ingrandimenti con illuminazione radente a lampada. Solo occasionalmente, in presenza di organismi molto piccoli o poco comuni, è stato necessario utilizzare uno stereoscopio a 50 ingrandimenti.

La misurazione della grandezza degli organismi, nei casi in cui è risultata necessaria, è stata effettuata tramite un foglietto di carta millimetrata posto sotto alla capsula di Petri in esame.

Gli individui così identificati sono stati raccolti, suddividendoli in base ai gruppi definiti dal metodo QBS-ar, in provette di plastica contenenti alcool all'80%.

Il riconoscimento è stato reso possibile grazie all'utilizzo delle due chiavi identificative presenti all'interno del manuale da campo per l'applicazione del metodo QBS-ar (Codurri *et al.*, 2005), ovvero la "Chiave fenetica per il riconoscimento dei principali gruppi di microartropodi del suolo per il calcolo del QBS" ed il Libro Chiave.

Inoltre, sono stati utilizzati dei testi illustrati: "Ces animaux minuscules qui nous entourent" (Coineau *et al.*, 1997), "Guida alla conoscenza della biologia e dell'ecologia del suolo" (Menta, 2008) e "La fauna del suolo" (Latella & Gobbi, 2008).

Ai fini dell'analisi statistica, oltre al riconoscimento dei microartropodi e degli altri invertebrati, si è proceduto anche al loro conteggio.

4.6 Determinazione della CE e del pH

Nell'ambito dello studio in cui questa tesi è inserita, sui campioni di suolo raccolti sono stati determinati: CE, pH, contenuto d'acqua, sabbia, limo, argilla, TOC, TKN e C/N. Vengono qui riportate solo le procedure seguite per CE e pH, analisi eseguite personalmente dalla scrivente.

Riguardo alle metodiche utilizzate per le analisi chimiche sui suoli si è fatto riferimento ai "Metodi di Analisi Chimica del Suolo" riportati dal manuale del MiPAF (2000) pubblicato nel Supplemento Ordinario della Gazzetta Ufficiale n. 248 del 21-10-1999.

In particolare, per la misura del pH è stato applicato il metodo n. III.1 - ISO 10390 mentre, per la misura della CE, è stato applicato il metodo n. IV.1 - ISO 11265, con rapporto suolo acqua 1:2.5.

Pertanto, per ciascuna analisi, si è provveduto al trasferimento di 20 g del campione di terra fine in una provetta per centrifuga a cui sono stati aggiunti 50 ml di acqua deionizzata.

Le provette così preparate sono state messe ad agitare per due ore e successivamente centrifugate con velocità di 3000 giri/minuto per 10 minuti.

In seguito, si è provveduto alla misurazione della CE e del pH, dopo taratura dei sistemi di misura.

Per la taratura del conduttimetro, utilizzato per determinare la misura della CE, è stata utilizzata una soluzione standard di KCl.

Per la taratura del pHmetro, con cui è stata determinato il pH, si è fatto uso di tre soluzioni standard di riferimento aventi pH di 4, 7, 10 ed è stata quindi controllata la linearità del sistema.

4.7 Calcolo del QBS-ar

Terminato l'esame della selettura al microscopio, si è proseguito a rilevare le diverse forme biologiche (FB) presenti in ogni campione e ad assegnare loro un punteggio (EMI, Indice Ecomorfologico).

In base a quanto definito da Parisi (2001) e riportato nel manuale da campo per l'applicazione del metodo QBS-ar (Codurri *et al.*, 2005), le forme biologiche sono gruppi di organismi caratterizzati dall'avere gli stessi caratteri morfologici convergenti, in conseguenza del processo di adattamento al suolo. Proprio in base al grado di adattamento della forma biologica alla vita nel suolo è definita la scala di riferimento degli EMI, che variano da un minimo di 1 ad un massimo di 20 (Tab. 4.2).

Tab. 4.2. Indici Ecomorfologici (EMI) per il calcolo del QBS-ar (Parisi, 2001).

Gruppo	Punteggio	Note esplicative della tabella 1	
Proturi	20	<p>Per alcuni gruppi sistematici è indicato un solo valore di EMI, in altri casi un intervallo. Nel primo caso si tratta di un valore massimale ritenuto rappresentativo del livello di adattamento al suolo del gruppo stesso, nel secondo caso non si è ritenuto corretto attribuire un unico valore di EMI, data la variabilità di caratteri presenti all'interno del gruppo. Fatta eccezione per i Collemboli, per i quali è stato elaborato un apposito sistema di determinazione del valore di EMI (che andrà diviso per due, in quanto il valore massimo possibile è 40 e non 20 come nel sistema generale), per gli altri gruppi si applica il seguente sistema.</p> <p>Onotteri In generale il valore EMI è pari a 1, salvo il genere <i>Grillotalpa</i> (di agevole riconoscimento). Si osservi tuttavia che si tratta più propriamente di megafauna e pertanto non andrebbero conteggiati, come del resto i membri della famiglia <i>Grillidae</i>. Per essi l'EMI è uguale a 20.</p> <p>Emitteri Si tratta di forme per la maggior parte epigee o radicolate punti 1 Larve delle cicale, per le quali vale l'osservazione fatta per gli Onotteri punti 10</p> <p>Coleotteri Per le forme chiaramente epigee punti 1 I principali adattamenti alla vita endogena rilevabili nell'ispezione diretta degli esemplari sono: a) dimensioni inferiori a 2 mm punti 4 b) tegumenti sottili, con colori spesso testacei punti 5 c) microattinismo o attinismo (relativamente alle ali metatoraciche, carattere rilevabile per trasparenza) punti 5 d) microftalmia o anoftalmia punti 5 Nel caso di forme edalobie (che presentano tutti i caratteri sopra esposti) il valore di EMI è 20. Per queste forme è utile la consultazione del lavoro di Coiffait, 1958.</p> <p>Imenotteri In generale punti 1 Formicidi punti 5</p> <p>Aranoidi Forme superiori ai 5 mm punti 1 Forme piccole e scarsamente pigmentate punti 5</p> <p>Diplopodi Forme superiori ai 5 mm punti 10 Forme inferiori ai 5 mm punti 20</p> <p>Chilopodi Forme superiori ai 5 mm, ma con zampe ben sviluppate punti 10 Altre forme, in particolare i Geofilomorfi punti 20</p>	
Dipluri	20		
Collemboli	1-20		
Microcoryphia	10		
Zygentomata	10		
Dermatteri	1		
Ortotteri	1-20		
Embiotteri	10		
Blattari	5		
Psocotteri	1		
Emitteri	1-10		
Tisanotteri	1		
Coleotteri	1-20		
Imenotteri	1-5		
Ditteri (larve)	10		
Altri olometaboli (larve)	10		
(adulti)	1		
Per gli altri microartropodi viene proposto il seguente punteggio:			
Pseudoscorpioni	20		
Palpigradi	20		
Opilioni	10		
Araneidi	1-5		
Acanthi	20		
Isopodi	10		
Diplopodi	10-20		
Pauropodi	20		
Sinfili	20		
Chilopodi	10-20		

Quei gruppi tassonomici di microartropodi che comprendono specie tutte con lo stesso grado di adattamento alla vita edifica, corrispondono ad un'unica forma biologica, e perciò hanno un solo valore di EMI. Gli altri gruppi, come ad esempio Collemboli e Coleotteri, che comprendono specie a diverso grado di adattamento e dunque varie forme biologiche, hanno differenti valori di EMI.

Dopo aver definito gli EMI per i diversi gruppi individuati, si è proceduto con il calcolo dell'indice QBS-ar per ogni singolo campione, utilizzando la scheda apposita, fornita dal manuale (Tab. 4.3).

Come già indicato nel paragrafo 1.3.2.2, l'indice QBS-ar è la sommatoria di tutti gli EMI identificati. In particolare, per i gruppi che presentano diverse forme biologiche, e dunque differenti EMI, si considera solo il valore di EMI maggiore mostrato dal gruppo in una certa stazione (Parisi, 2001).

In base a quanto stabilito dal metodo, più è grande il valore di questo indice, maggiore è la qualità ecologica del suolo.

Tab. 4.3. Scheda per il calcolo dell'indice QBS-ar (EMI totale), relativa ad un singolo campione (Codurri et al., 2005).

	GRUPPI	EMI	Pres./Ass.	N° indiv.
Pseudoscorpioni		20		
Scorpioni	Forme giovanili	10		
Palpigradi		20		
Opilioni		10		
Araneidi	Forme superiori a 5 mm	1		
	Forme piccole e poco pigmentate	5		
Acari		20		
Isopodi		10		
Diplopodi	Forme superiori a 5 mm	10		
	Forme inferiori a 5 mm	20		
Pauropodi		20		
Sinfilii		20		
Chilopodi	Forme superiori a 5 mm ma con zampe ben sviluppate	10		
	Altre forme (Geofilomorfi)	20		
Proturi		20		
Dipluri		20		
Collemboli	Forme epigee: appendici allungate, ben svilupp. Apparato visivo (macchia ocellare e occhi) ben svilupp. Dimensioni medie/grandi, presenza di livrea complessa.	1		
	Forme epigee non legate alla vegetaz. arborea, buon sviluppo delle appendici, forte sviluppo di setole o squame. Apparato visivo ben svilupp.	2		
	Forme di piccola dimensione con medio sviluppo delle appendici, apparato visivo ben sviluppato, livrea modesta, forme limitate alla lettiera.	4		
	Forme emiedafiche con apparato visivo ben sviluppato, appendici non allungate, livrea con colore.	6		
	Forme emiedafiche con riduzione del numero di ocelli, appendici poco sviluppate, con furca ridotta o assente. Presenza di pigmentazione.	8		
	Forme euedafiche con pigmentazione assente, riduzione o assenza di ocelli. Furca presente ma ridotta.	10		
	Forme euedafiche depigmentate, prive di furca, appendici tozze, presenza di pseudopeduncoli, organo postantennale sviluppato (se presente), strutture sensoriali apomorfiche.	20		
Microcorifi		10		
Zigentomi		10		
Dermatteri		1		
Ortotteri	In generale	1		
	Famiglia Grillidae	20		
Embiotteri		10		
Fasmodei		1		
Mantodei		1		
Mecotteri		1		
Isotteri		10		
Blattari		5		
Psocotteri		1		
Emitteri	Forme epigee	1		
	Larva cicala	10		
Rafidiotteri		1		
Tisanotteri		1		
Coleotteri	Forme epigee	1		
	Dimensioni < 2mm	4+		
	Tegumenti sottili, con colori testacei	5+		
	Microatterismo o atterismo	5+		
	Microftalmia o anoftalmia	5+		
	Nel caso di forme edafobie	20		
Imenotteri	In generale	1		
	Formicidi	5		
Ditteri	Adulti	10		
Rafidiotteri		10		
Planipenni		10		
Mecotteri (larve)		10		
Coleotteri (larve)		10		
Ditteri (larve)		10		
Imenotteri (larve)		10		
Lepidotteri		10		
Altri olometaboli	Adulti	1		
		EMI tot		

Dopo aver determinato l'indice QBS-ar per tutti i campioni, si è provveduto a calcolare il valore dell'indice QBS-ar max (QBS massimale), corrispondente alla sommatoria degli EMI associati a tutte le forme biologiche trovate complessivamente nei tre campioni (A, B, C) di ogni stazione (San Vitale, Cerba, Pirottolo) presenti in ciascun transetto.

In particolare, in presenza di taxa contenenti più forme biologiche, è stato considerato solo il valore di EMI maggiore tra quelli trovati nei tre campioni, come indicato dal manuale (Codurri *et al.*, 2005). Ad esempio, se nei tre campioni sono stati trovati individui del gruppo Araneidi corrispondenti sia al valore di EMI 1, sia al valore di EMI 5, nel calcolo dell'indice QBS-ar max è stato considerato solo il valore 5.

Per la determinazione dell'indice QBS-ar max è stata utilizzata un'altra scheda (Tab. 4.4), fornita sempre dal manuale, nella quale sono stati riportati i valori di EMI definiti per le forme biologiche individuate nei tre campioni (indicati come repliche nella scheda) e i valori dell'indice QBS-ar calcolati per ciascun campione.

Tab. 4.4. Scheda per il calcolo dell'indice QBS-ar max , relativa ad una stazione (Codurri et al., 2005).

	EMI	1a replica	2a replica	3a replica	QBS-ar max
Pseudoscorpioni	20				
Scorpioni	10				
Palpigradi	20				
Opilioni	10				
Araneidi	1				
	5				
Acari	20				
Isopodi	10				
Diplopodi	10				
	20				
Paupodi	20				
Sinfili	20				
Chilopodi	10				
	20				
Proturi	20				
Dipluri	20				
Collemboli	1				
	2				
	4				
	6				
	8				
	10				
	20				
Microcorifi	10				
Zigotomi	10				
Dermatari	1				
Ortotteri	1				
	20				
Embiotteri	10				
Fasmodei	1				
Mantodei	1				
Mecotteri	1				
Isotteri	10				
Blattari	5				
Psocotteri	1				
Emitteri	1				
	10				
Rafidiotteri	1				
Tisanotteri	1				
Coleotteri (*)	1				
	+ 4				
	+ 5				
	+ 5				
	+ 5				
	20				
Imenotteri	1				
	5				
Ditteri	1				
Rafidiotteri (larve)	10				
Planipenni (larve)	1				
Mecotteri (larve)	10				
Coleotteri (larve)	10				
Ditteri (larve)	10				
Imenotteri (larve)	10				
Lepidotteri (larve)	10				
Altri olometaboli	1				
QBS					

4.8 Individuazione delle classi di qualità del suolo

Dopo aver determinato i valori di QBS-ar max per le stazioni di tutti i transetti, si è proseguito con l'identificazione delle classi di qualità del suolo, sebbene tale sistema di valutazione del QBS sia ancora in fase sperimentale e quindi suscettibile di possibili modifiche. Nonostante questo, i test finora condotti con tale suddivisione, prevalentemente su suoli dell'Italia settentrionale, hanno portato a buoni risultati.

Pertanto, la classificazione è avvenuta sulla base dello schema riportato in Fig. 4.10, nel quale sono definite otto classi di qualità (dalla classe 0 alla classe 7), in ordine crescente di complessità del popolamento in relazione all'adattamento alla vita edafica.

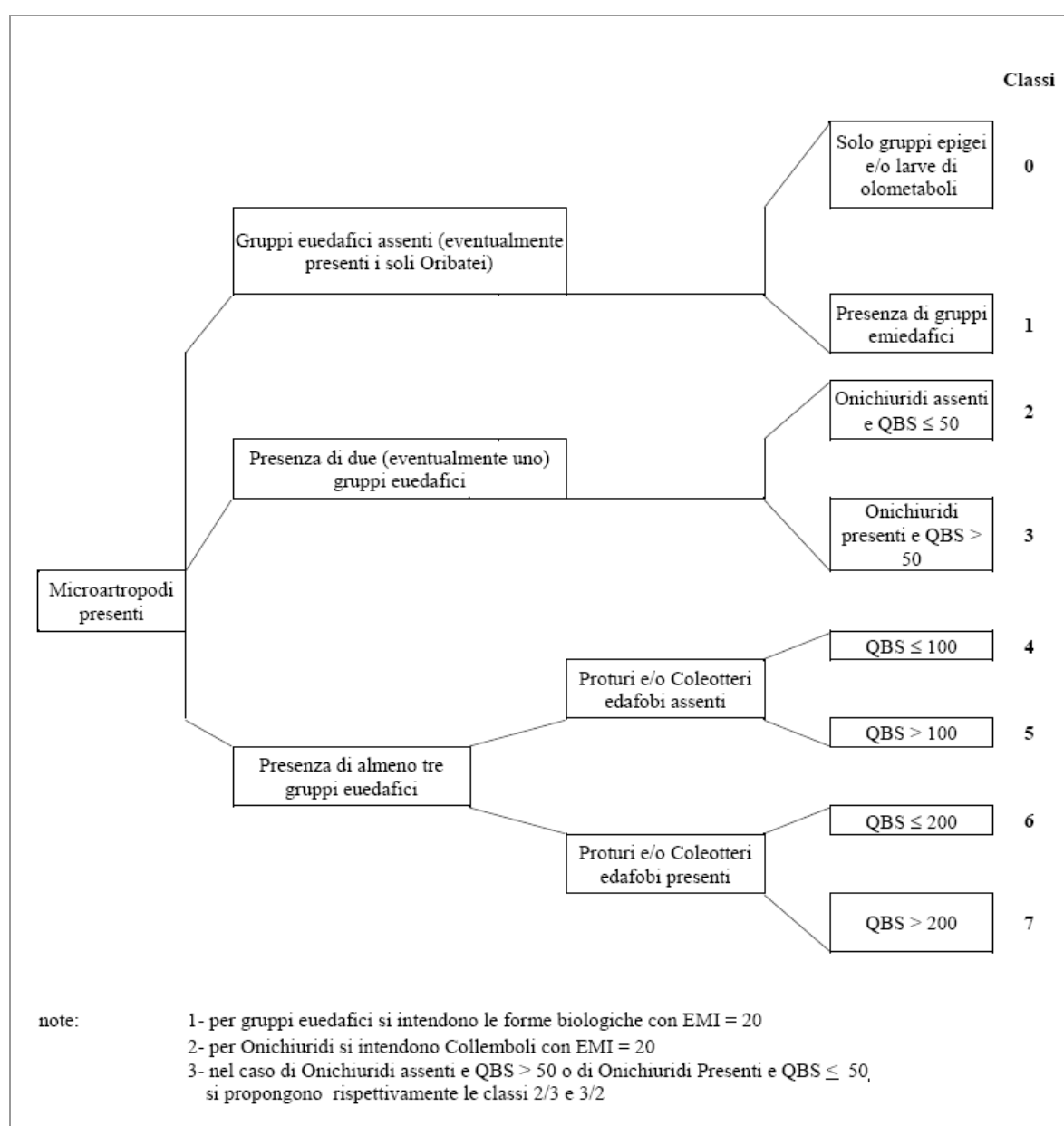


Fig. 4.10. Suddivisione in classi dei valori di QBS-ar (classificazione definita da Parisi, 2001 e modificata in seguito da D'Avino, 2002).

4.9 Analisi statistica dei dati

Dal momento che sia le caratteristiche chimiche e fisiche del suolo, sia le caratteristiche del suo popolamento biologico sono descritte da un elevato numero di variabili, per l'analisi dei dati si è ritenuto opportuno utilizzare in prevalenza metodi statistici multivariati, cioè metodi in grado di descrivere i pattern di variazione e di valutare le differenze tra diversi campioni sulla base di più variabili simultaneamente.

Per la valutazione sui tipi di analisi da compiere e su come applicarle soprattutto in relazione agli obiettivi del presente studio, come supporto teorico si è fatto riferimento a Clarke & Warwick (2001), Anderson *et al.* (2008) e Legendre & Legendre (1998).

Per l'applicazione dei metodi sono stati utilizzati i software STATISTICA e PRIMER 5 (Clarke & Warwick, 2001).

4.9.1 Dati utilizzati

Il punto di partenza per tutti i metodi di analisi multivariata è costituito dalle matrici dati, cioè tabelle in cui ogni colonna rappresenta una variabile e ogni riga rappresenta un campione; in tal modo si ottiene che ogni cella corrisponde al valore associato ad una specifica variabile per un certo campione. Va notato che questa convenzione di uso generale, adottata nel presente lavoro, è diversa da quella spesso usata nelle applicazioni dell'analisi multivariata in ecologia di comunità, secondo cui le variabili (in questo caso le specie o altri taxa) sono lungo le righe e i campioni lungo le colonne (Clarke & Warwick, 2001).

Nel presente studio sono state utilizzate quattro diverse matrici dati.

La prima contiene i dati relativi alle caratteristiche chimiche e fisiche del suolo che sono state misurate in tutti i campioni, cioè nelle repliche A, B e C di tutte le stazioni: CE, pH, contenuto in acqua (tre variabili per 54 campioni).

La seconda matrice contiene i dati relativi alle caratteristiche chimiche e fisiche del suolo misurate solo sul campione in posizione centrale di ciascuna stazione (campioni B), corrispondenti, oltre a CE, pH e contenuto d'acqua, al contenuto di sabbia, limo, argilla, TOC, TKN e il rapporto C/N (nove variabili per 18 campioni).

La terza matrice contiene i dati biologici di tutti i campioni: sono state considerate le densità numeriche relative a tutti i taxa individuati, in termini di numero di individui per campione (17 variabili per 54 campioni).

La quarta matrice contiene i dati biologici solo dei campioni B, le variabili sono le stesse della matrice con dati biologici appena descritta, ma in questo caso si considera un suo sottoinsieme per valutare la correlazione con i dati abiotici raccolti solo sui campioni B (17 variabili per 18 campioni).

I dati abiotici relativi alle prime due matrici sono stati normalizzati, secondo l'accezione data a questo termine da Clarke & Warwick (2001), intendendo in tal modo che i dati hanno subito una elaborazione volta ad eliminare l'effetto delle unità di misura e degli intervalli di variazione propri di ogni variabile. La normalizzazione è avvenuta secondo la formula:

$$Z_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{\sigma}$$

(x_i è il valore di una certa variabile per un certo campione, \bar{x} è la media dei valori per quella stessa variabile per tutti i campioni e σ è la deviazione standard dei valori per quella stessa variabile per tutti i campioni).

Per quanto riguarda le matrici contenenti dati biologici, per pesare in modo equilibrato il contributo dei differenti taxa, alcuni dei quali rari (presentano un basso numero o addirittura assenza d'individui) in diversi campioni, mentre altri molto presenti, è stata applicata come trasformazione la radice quarta. Tale trasformazione è comunemente ritenuta tra le più consone per questo tipo di dati perché, come sostenuto anche da Clarke & Warwick (2001), permette anche alle specie rare di influire sul risultato delle analisi, senza però che il loro contributo diventi eccessivamente importante rispetto a quello delle specie abbondanti.

Secondo la terminologia usata da Legendre & Legendre (1998) si dice che una matrice dati è analizzata in modalità Q quando si studia la relazione tra campioni, in modalità R quando si considera la relazione tra variabili. Nel presente lavoro le analisi sono prevalentemente condotte in modalità Q.

4.9.2 Misure di distanza

Nella maggior parte dei metodi di analisi multivariata il primo passo consiste nella creazione, a partire dalla matrice dati, di una matrice di associazione, mediante il calcolo di un coefficiente di associazione (Legendre & Legendre, 1998).

Per coefficiente di associazione s'intende una misura che quantifichi il grado di somiglianza o differenza tra due campioni (modalità Q) o tra due variabili (modalità R). Rientrano in questa categoria i coefficienti di similarità, di dissimilarità, di dipendenza.

La matrice di associazione è una matrice quadrata in cui, se si effettua un'analisi in modalità Q, sia le righe che le colonne rappresentano i campioni. Se si effettua un'analisi in modalità R invece sia le righe che le colonne rappresentano variabili. Ogni elemento della matrice è costituito dal valore ottenuto calcolando il coefficiente di associazione prescelto tra il campione (o la variabile) corrispondente alla riga e il campione (o la variabile) corrispondente alla colonna.

Per i dati abiotici, come coefficiente di associazione, è stata utilizzata la distanza euclidea. Infatti, tale tipologia di variabili non presenta un gran numero di valori nulli che potrebbero falsare i risultati, come può succedere nel caso di variabili biologiche. La formula per calcolare la distanza Euclidea tra due campioni è:

$$d_{jk} = \sqrt{\sum (y_{ij} - y_{ik})^2}$$

dove y_{ij} è l'abbondanza dell' i -esima specie (nel nostro caso taxa) nel j -esimo campione e y_{ik} è l'abbondanza dell' i -esima specie nel k -esimo campione

Secondo tale metodo di misura, la doppia assenza, ossia due valori nulli in due campioni per una stessa variabile, assume lo stesso significato di una doppia presenza. Così, considerando variabili biologiche, in una situazione limite può accadere il paradosso che due campioni effettivamente differenti perché non aventi specie in comune, risultino più vicini (più simili) rispetto a due campioni con alcune specie in comune (Legendre & Legendre, 1998).

Per i dati biologici, come coefficiente di associazione, è stata considerata la distanza definita dall'indice di dissimilarità di Bray-Curtis (Bray & Curtis, 1957), applicata sui dati di abbondanza trasformati con la radice quarta, ottenendo la matrice delle distanze tra coppie di campioni.

Il calcolo dell'indice avviene in base alla formula:

$$d_{jk} = 100 \frac{\sum_i |x_{ij} - x_{ik}|}{\sum_i x_{ij} + x_{ik}}$$

dove y_{ij} è l'abbondanza dell' i -esimo taxon nel j -esimo campione e y_{ik} è l'abbondanza dell' i -esimo taxon nel k -esimo campione.

L'indice di dissimilarità di Bray-Curtis è il più utilizzato in ecologia per la sua robustezza, maggiore rispetto a tutti gli altri coefficienti di associazione utilizzati, come risulta da uno studio di Faith *et al.* (1987) e per alcune peculiarità, tra le quali assumere valore 0 quando due campioni non presentano taxa in comune e non subire variazioni per inclusione o esclusione di un taxon che si presenta con una doppia assenza in due campioni (Clarke & Warwick, 2001).

4.9.3 Analisi delle Componenti Principali (PCA)

Per la rappresentazione delle relazioni tra campioni, definite dalle matrici di distanze euclidee ottenute a partire dalle variabili abiotiche, è stata applicata la PCA, una tecnica di ordinamento ben affermata e largamente utilizzata in molti settori scientifici.

In statistica multivariata sono indicati come tecniche di ordinamento tutti i metodi che hanno l'obiettivo di rappresentare un sistema di per sé caratterizzato da un elevato numero di dimensioni, utilizzando un numero di dimensioni ridotto, usualmente due o al massimo tre. Questi metodi descrivono il sistema di interesse utilizzando, al posto delle n variabili effettivamente misurate, due o tre variabili, definite dal metodo stesso, che hanno la proprietà di conservare nella maggior misura possibile l'informazione originale. Uno dei vantaggi di tale approccio è la possibilità di rappresentare graficamente i campioni come punti in un piano, utilizzando come assi cartesiani le nuove variabili, permettendo di valutarne visivamente le relazioni. In altri termini, le tecniche di ordinamento possono essere intese come metodi grafici per visualizzare l'informazione contenuta nella matrice di associazione.

I diversi metodi di ordinamento hanno in comune il principio generale appena descritto, ma differiscono tra loro per quanto riguarda il modo di definire le variabili utilizzate per la rappresentazione.

L'idea che sta alla base della PCA è individuare nuove variabili, dette componenti principali (PC) che siano combinazioni lineari di quelle originali. Queste nuove variabili sono individuate in ordine in modo che la prima (prima componente principale, PC1) sia quella con la varianza più elevata; la seconda componente principale (PC2) è la variabile con la varianza più elevata tra tutte quelle ortogonali alla prima, e così via. La riduzione della complessità avviene proprio limitandosi ad analizzare e a utilizzare come assi per la rappresentazione grafica solo le prime due o tre PC, quelle che rappresentano la maggiore varianza.

L'aspetto che distingue la PCA da altri metodi di ordinamento è che esiste una relazione diretta tra i nuovi assi e le variabili originali. I coefficienti (indicati come a_{ij}) applicati alle variabili originali, nella combinazione lineare che definisce ciascuna PC, esprimono il peso di ciascuna delle variabili originali nella definizione della nuova variabile.

Il principio della PCA può essere compreso a partire da casi semplificati ipotetici, in cui i campioni sono descritti da solo due o tre variabili. Considerando l'esempio riportato in Fig. 4.11, avendo due variabili, misurate per un certo numero di campioni, rappresentabili dagli assi cartesiani di uno spazio a due dimensioni, si può attuare una trasformazione

proiettando i punti (i valori delle due variabili calcolati per ciascun campione) su un nuovo asse che approssima al meglio lo spazio a due dimensioni, riproducendo al meglio le distanze tra campioni, riducendolo ad uno spazio a una dimensione.

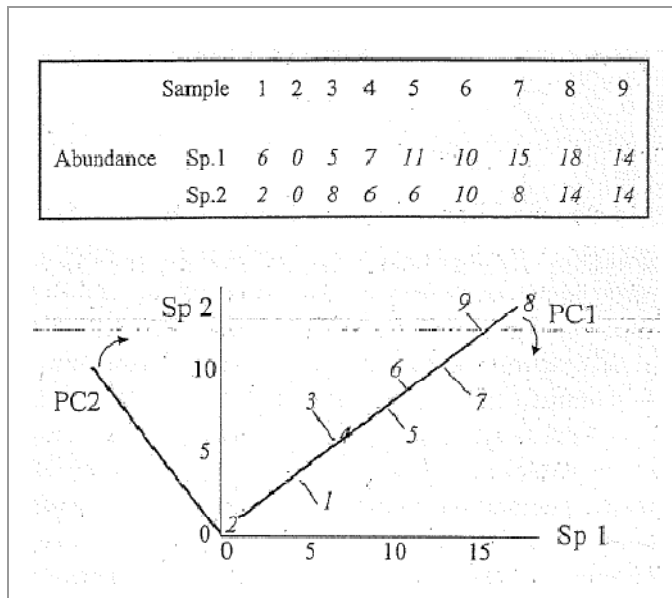


Fig. 4.11. Esempio dell'applicazione della PCA nel caso di due variabili (Sp1 e Sp2) (Clarke & Warwick, 2001).

Aumentando il numero di variabili da due a tre, passando quindi ad uno spazio a tre dimensioni, si può applicare la trasformazione ottenendo tre nuove variabili rappresentate da tre nuovi assi, rotazioni degli assi originali. Sebbene il primo asse sia quello associato alla nuova variabile con la maggiore varianza, in questo caso il secondo asse assume maggiore importanza in termini di rappresentazione della varianza tra campioni, rispetto alla situazione con sole due variabili. Pertanto si considera uno spazio a due dimensioni definito da due nuovi assi, che meglio approssima le distanze tra i campioni. Il terzo asse, perpendicolare agli altri due, corrisponde ad una nuova variabile trascurabile riguardo alla varianza rappresentata.

Considerando infine la situazione con un certo numero di variabili corrispondenti ad uno spazio a più dimensioni dove collocare i campioni, ci sono due approssimazioni più comunemente utilizzate: la prima corrisponde ad uno spazio a due dimensioni, riassumendo la varianza in due nuove variabili; la seconda prevede un ordinamento in uno spazio tridimensionale, definito da tre nuove variabili. La scelta tra queste due approssimazioni ma anche quella di considerare eventualmente anche altre PC, avviene in base alla varianza spiegata, espressa in percentuale di quella totale, cioè della somma delle varianze di tutte le PC. Secondo quanto riportato da Clarke & Warwick (2001) la nuova

rappresentazione è ritenuta comunemente valida se rappresenta circa il 70-75 % della varianza originaria.

Dal punto di vista algebrico, la combinazione lineare per ottenere la PC1 è:

$$PC_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1p}x_p$$

In tal modo si individua la combinazione di pesi (a) che massimizza la varianza di PC_1 :

$$P_i = 100 \frac{\text{var}(PC_i)}{\sum_i \text{var}(PC_i)}$$

sotto la condizione che $\sum a_{1i}^2 = 1$.

La PC2 è data da:

$$PC_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2p}x_p$$

dove i pesi sono determinati massimizzando la varianza di PC_2 , sotto i vincoli: $\sum a_{2i}^2 = 1$
 $\sum (a_{1i} \cdot a_{2i}) = 0$.

Il processo può essere così ripetuto fino ad ottenere p PC.

4.9.4 Analisi delle Coordinate Principali (PCO)

Per l'ordinamento dei dati biologici, sulla base della matrice di distanze di Bray-Curtis, è stata applicata la PCO.

Come espresso da Gower (1966), la PCO rappresenta un'estensione della PCA che permette l'ordinamento dei campioni, secondo un'ampia tipologia di distanze e non solamente quella euclidea.

La PCO produce una rappresentazione dei campioni nello spazio euclideo rispettando le relazioni di distanza calcolate attraverso qualsiasi misura di distanza, nel nostro caso quella di Bray-Curtis. Nella PCO la rappresentazione dei campioni nello spazio ridotto delle prime coordinate principali, corrisponde alla migliore approssimazione euclidea possibile delle distanze originali. Rispetto alla PCA, per la quale esiste una diretta relazione tra le coordinate principali e le variabili originarie, nella PCO le variabili originarie non hanno alcun ruolo diretto nel calcolo delle nuove coordinate, ma servono solo a determinare la matrice delle distanze tra i campioni (Legendre & Legendre, 1998).

Quando la PCO è applicata ad una matrice di distanze euclidee, si ottiene un ordinamento dei punti assolutamente equivalente a quello prodotto dalla PCA.

4.9.5 Analisi multivariata della varianza per permutazioni (PERMANOVA)

Il piano di campionamento adottato in questo studio corrisponde ad un disegno sperimentale a tre fattori: zona, transetto e pedotipo. Il primo fattore, considerato fisso, ha assunto due livelli, est e ovest; il secondo, considerato *random* (si potrebbero identificare molti altri transetti), ne ha assunti sei (tre per ogni livello del fattore zona), in base al numero di transetti identificati; il terzo, anch'esso fisso, ha assunto tre livelli, San Vitale, Cerba e Pirottolo. Inoltre, sia i fattori zona e pedotipo, che i fattori transetto e tipo di suolo, avendo un rapporto reciproco simmetrico, sono stati considerati ortogonali tra loro (ogni pedotipo è presente in tutte e due le zone e in tutti i transetti). Il fattore transetto è stato considerato *nested* (gerarchizzato) nel fattore zona (ogni transetto ha una specifica collocazione in una sola delle due zone).

Per verificare se i fattori identificati avessero effetti statisticamente significativi è stata applicata l'analisi multivariata della varianza basata sulle permutazioni (PERMANOVA, Anderson, 2001). La PERMANOVA, come l'analisi della varianza classica (ANOVA) confronta tra loro gruppi di campioni definiti sulla base di uno o più fattori, detti anche criteri di classificazione. A differenza dell'ANOVA però, utilizza indici di similarità o dissimilarità multivariati, e fornisce test di ipotesi nulle sulla base di procedure di permutazione (Anderson *et al.*, 2008).

Sebbene possa essere applicata in diversi ambiti, dalla zoologia, alla genetica e perfino alla psicologia, la PERMANOVA viene utilizzata principalmente per l'analisi di dati ecologici, specialmente in termini di abbondanze di specie.

Come altre tecniche di permutazione, la PERMANOVA è adatta all'analisi di dati che non soddisfano le assunzioni tipiche della statistica tradizionale, sia per l'elevato numero di variabili considerate, sia perché una o più variabili non sono distribuite normalmente. L'unico vincolo è che sia i campioni che gli errori associati possano essere ricombinati, rispettando una specifica ipotesi nulla. In altre parole, queste tecniche non richiedono esplicite assunzioni sulle distribuzioni delle variabili originarie e utilizzano le permutazioni per ottenere la distribuzione di probabilità attesa nel caso in cui sia vera l'ipotesi nulla.

Anche nel caso della PERMANOVA, come per gli altri metodi di analisi multivariata, il punto di partenza è una matrice di associazione, nel caso presente la matrice di distanze euclidee per i dati abiotici, quella di dissimilarità di Bray-Curtis per i dati biologici.

Nell'ANOVA, vengono calcolate le differenze (scarti) tra le singole osservazioni appartenenti ad un gruppo e la media del gruppo stesso. I quadrati di queste distanze sono

poi sommati tra loro per ottenere la somma dei quadrati residua (SS_{res}), che è una misura cumulativa delle differenze presenti all'interno dei gruppi.

Nel caso multivariato la tendenza centrale di un campione è espressa dal centroide. Nella PERMANOVA, analogamente all'ANOVA, a partire dalla matrice di associazione tra campioni si calcolano le distanze tra i singoli campioni ed il centroide del gruppo a cui appartengono (Fig. 4.12 B). Anche in questo caso la somma dei quadrati delle distanze costituisce la SS_{res} .

Così come nell'ANOVA si calcolano poi le differenze tra medie dei singoli gruppi e la loro media, nella PERMANOVA si computano le distanze tra i centroidi dei gruppi e il centroide dei centroidi (Fig. 4.12 C). La somma dei loro quadrati costituisce la SS_A che rende conto delle differenze tra gruppi.

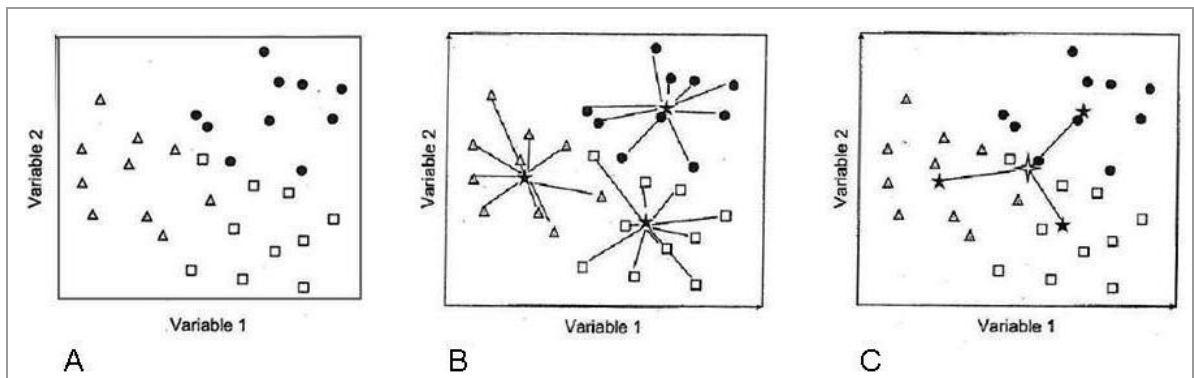


Fig. 4.12. PERMANOVA, calcolo delle distanze. Diagramma di un ipotetico *dataset*, formato da 2 variabili (due dimensioni) e 10 campioni per ciasun gruppo (A). Distanze dei campioni dai centroidi (B). Distanze dei centroidi dal centroide dei centroidi (C).

In base all'ipotesi nulla che sostiene l'assenza di differenze tra i campioni in ambito multivariato, è stato calcolato il rapporto pseudo F che, analogamente al rapporto F usato nell'ANOVA, è uguale a:

$$F = \frac{SS_A/(a-1)}{SS_{Res}/(N-a)}$$

dove, $(a - 1)$ sono i gradi di libertà associati al fattore indagato e $(N - a)$ sono i gradi di libertà residui, con a numero dei livelli del fattore (gruppi) e N numero totale di osservazioni.

Come risulta dalla formula, maggiore è il valore di pseudo F e minore è la probabilità che l'ipotesi nulla sia vera.

Nell'ANOVA, sotto la condizione che siano rispettate le assunzioni del metodo (osservazioni indipendenti, distribuite normalmente e con varianze omogenee) e che sia rispettata l'ipotesi nulla, la distribuzione del rapporto F è conosciuta, cioè le probabilità

associate ai suoi valori sono calcolabili usando un'equazione nota a priori. Questo permette di calcolare quanto sarebbe probabile il valore di F se l'ipotesi nulla fosse vera.

Nella PERMANOVA invece la distribuzione dello pseudo F sotto l'ipotesi nulla deve essere calcolata in ogni analisi, volta per volta tramite le permutazioni. Secondo questo approccio, una volta calcolata la pseudo F con i gruppi così come sono stati effettivamente osservati, le singole osservazioni sono scambiate tra i gruppi secondo tutte le combinazioni possibili (o secondo un sottoinsieme casuale, se le combinazioni totali possibili sono in numero troppo elevato). Per ogni combinazione viene calcolato la pseudo F .

L'idea che sta alla base di tale procedura è che se è vera l'ipotesi nulla, per cui non si hanno differenze tra i campioni in relazione ad alcun fattore, allora è altrettanto vero che variando le relazioni tra i campioni sulla base dei vari fattori considerati non si avrà alcun cambiamento sulle loro differenze (Anderson *et al.*, 2008).

Nel nostro caso, in ogni analisi, ciascuna sorgente di variazione presente nel disegno sperimentale è stata testata tramite 9999 permutazioni *random* o comunque sino a realizzare tutte le ricombinazioni possibili, ottenendo in tal modo la distribuzione dello pseudo F se fosse rispettata l'ipotesi nulla.

Il livello di significatività del test, cioè la probabilità di osservare un valore di pseudo F maggiore o uguale a quello effettivamente osservato, nel caso in cui l'ipotesi nulla sia vera, viene calcolato secondo la formula:

$$P = \frac{(N \text{ di } F^{\pi} \geq F) + 1}{(N \text{ di } F^{\pi}) + 1}$$

dove $(N \text{ di } F^{\pi} \geq F)$ è il numero dei valori di pseudo F , ottenuti dalle permutazioni, maggiori o uguali allo pseudo F trovato inizialmente e $(N \text{ di } F^{\pi})$ è il numero di tutti gli pseudo F trovati con tutte le permutazioni. Lo pseudo F trovato inizialmente è considerato membro della distribuzione e pertanto viene inserito nel calcolo di P (probabilità di rigettare l'ipotesi nulla) come +1 sia al numeratore che al denominatore.

4.9.6 Procedura BIOENV

La procedura BIOENV ha lo scopo di verificare la correlazione complessiva delle variabili che descrivono la struttura di un popolamento (abbondanze o biomasse dei taxa che compongono il popolamento) con le variabili abiotiche che descrivono l'ambiente chimico e fisico in cui il popolamento è insediato. In altri termini il metodo valuta se le caratteristiche abiotiche spiegano le differenze tra i popolamenti dei diversi campioni. Deve essere sottolineato che, come tutti i metodi di correlazione BIOENV di per sé non può stabilire relazioni di causa-effetto ma solo misurare il grado di concordanza tra due insiemi di variabili. La procedura BIOENV si applica per analizzare il grado di corrispondenza tra una matrice di dati biologici (abbondanza, biomassa, ecc.) e una matrice di dati abiotici.

Più precisamente il metodo valuta il grado di concordanza tra la matrice di associazione costruita sulla base delle variabili biologiche e quella costruita sulla base delle variabili abiotiche, calcolando un coefficiente di correlazione tra i valori collocati nelle celle corrispondenti delle due matrici.

Il principio di BIOENV è che se le variabili abiotiche spiegano la struttura del popolamento, allora le relazioni tra campioni definite sulla base dei due insiemi di variabili sono equivalenti.

Nel presente studio la procedura è stata applicata a tutti i campioni per valutare la correlazione tra abbondanza dei taxa e CE, pH e contenuto d'acqua e ai soli campioni B per valutare la correlazione tra abbondanza dei taxa e le variabili abiotiche misurate solo su questo sottoinsieme. per tutti i campioni e la matrice con i dati biologici solo per i campioni B con quella contenente tutti i dati abiotici relativi solo ai campioni B.

In entrambe i casi per valutare la correlazione tra dissimilarità di Bray-Curtis e distanza euclidea è stato utilizzato il coefficiente di correlazione non parametrico per ranghi di Spearman, calcolato secondo la formula:

$$\rho_s = 1 - \frac{6}{N(N^2-1)} \cdot \sum_{i=1}^N (r_i - s_i)^2$$

dove $(r_i - s_i)$ è la differenza dei ranghi (essendo r_i e s_i rispettivamente il rango della prima variabile e della seconda variabile della i -esima osservazione) e N il numero complessivo di osservazioni.

Il valore di ρ_s è compreso tra meno uno (completa discordanza) e più uno (completa concordanza), quando assume valore zero significa che le variabili biologiche sono completamente indipendenti da quelle abiotiche.

È importante osservare che la spiegazione delle variabili biologiche può essere fornita anche solo da alcune variabili abiotiche e non necessariamente da tutte. Una variabile che non contribuisce a spiegare i dati biologici tende ad abbassare il grado di correlazione tra le due matrici di associazione.

La procedura BIOENV, quindi non calcola solo la correlazione tra la matrice di associazione biologica e quella costruita a partire da tutte le variabili abiotiche, ma anche la correlazione con le matrici costruite a partire da tutti i possibili sottoinsiemi di variabili abiotiche. In questo modo individua quale combinazione massimizzi la correlazione tra le due categorie di dati.

Una volta individuata la combinazione che fornisce la correlazione più elevata, viene utilizzato un test basato sulle permutazioni, per calcolare il corrispondente livello di significatività, analogamente a quanto viene fatto nella PERMANOVA. Nel presente studio sono state usate 999 permutazioni.

4.9.7 *Bubble plots* (grafici a bolle)

Secondo l'approccio multivariato, le relazioni tra campioni, espresse dalla matrice di associazione, sono determinate dalle variabili nel loro insieme. Può però essere importante valutare il ruolo svolto da una singola variabile nel determinare questi rapporti. In altri termini, anche se tutte le variabili concorrono al risultato, ci si può chiedere quale sia il peso di una singola variabile.

I *bubble plots* (grafici a bolle) sono un metodo per rappresentare graficamente il ruolo svolto da una singola variabile nel determinare le relazioni tra campioni; si ottengono sovrapponendo a un diagramma di ordinamento i valori della variabile di interesse. Per fare questo ogni campione è rappresentato sul piano di ordinamento utilizzando un cerchio (bolla) di diametro proporzionale al valore della variabile per quel campione.

5. Risultati

5.1 Le caratteristiche chimiche e fisiche dei suoli

5.1.1 CE, pH e contenuto d'acqua

Nelle Tab. 5.1; 5.2; 5.3; 5.4; 5.5; 5.6 sono riportati i valori di CE, pH e contenuto d'acqua determinati su tutti i campioni di suolo prelevati in corrispondenza dei sei transetti. I *range* di variazione sono compresi tra 0.07 e 1.62 dS/m per la CE, tra 4.8 e 8.6 per il pH e tra 10.21% e 218.51% per il contenuto d'acqua (valori così elevati sono possibili perché determinati su campioni contenenti anche la lettiera, composta da materiale organico leggero e con grande capacità di adsorbire acqua).

Tab. 5.1. CE, pH e contenuto d'acqua dei campioni del transetto 1.

TRANSETTO 1	SAN VITALE			CERBA			PIROTTOLO		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
CE a 25 °C (dS/m)	0,11	0,17	0,10	0,12	0,09	0,13	0,17	0,24	0,18
pH	6,4	6,7	7,2	4,9	5,9	6,1	6,5	7,6	7,9
Contenuto d'acqua (%)	35,00	26,35	17,17	33,01	15,54	33,10	30,14	36,76	69,07

Tab. 5.2. CE, pH e contenuto d'acqua dei campioni del transetto 2.

TRANSETTO 2	SAN VITALE			CERBA			PIROTTOLO		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
CE a 25 °C (dS/m)	0,07	0,12	0,17	0,23	0,57	0,18	0,38	1,00	0,33
pH	7,2	7,9	7,7	7,5	4,8	5,1	8,4	8,0	8,4
Contenuto d'acqua (%)	15,92	2,63	29,41	25,16	40,02	27,99	46,98	47,55	56,89

Tab. 5.3. CE, pH e contenuto d'acqua dei campioni del transetto 3.

TRANSETTO 3	SAN VITALE			CERBA			PIROTTOLO		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
CE a 25 °C (dS/m)	0,09	0,13	0,08	0,14	0,14	0,10	0,29	0,45	0,26
pH	8,1	8,1	7,6	7,5	7,0	7,8	8,1	7,9	8,0
Contenuto d'acqua (%)	10,21	14,02	11,70	19,97	23,60	14,00	51,67	45,13	45,45

Tab. 5.4. CE, pH e contenuto d'acqua dei campioni del transetto 4.

TRANSETTO 4	SAN VITALE			CERBA			PIROTTOLO		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
CE a 25 °C (dS/m)	0,21	0,28	0,18	0,15	0,25	0,17	0,22	0,55	0,40
pH	7,8	7,6	7,5	7,9	7,0	8,2	7,7	8,1	8,4
Contenuto d'acqua (%)	27,64	31,64	28,98	29,14	33,21	32,28	28,07	39,31	51,58

Tab. 5.5. CE, pH e contenuto d'acqua dei campioni del transetto 5.

TRANSETTO 5	SAN VITALE			CERBA			PIROTTOLO		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
CE a 25 °C (dS/m)	0,21	0,20	0,19	0,17	0,23	0,18	0,38	0,48	1,62
pH	7,9	7,8	7,8	8,0	7,4	7,7	8,6	7,9	7,2
Contenuto d'acqua (%)	21,50	19,97	20,35	21,00	25,01	26,55	62,77	103,37	218,51

Tab. 5.6. CE, pH e contenuto d'acqua dei campioni del transetto 6.

TRANSETTO 6	SAN VITALE			CERBA			PIROTTOLO		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
CE a 25 °C (dS/m)	0,39	0,24	0,29	0,25	0,28	0,18	0,28	0,41	0,43
pH	6,9	7,6	7,2	7,1	7,6	7,8	7,8	7,3	7,5
Contenuto d'acqua (%)	31,60	25,66	34,85	30,61	31,43	35,06	78,34	73,23	121,82

Nella Fig. 5.1 è riportato il diagramma di ordinamento ottenuto applicando la PCA a tutti i campioni raccolti, considerando come variabili la CE, il pH e il contenuto d'acqua del suolo. I campioni appartenenti alle due zone sono stati contrassegnati usando due colori diversi.

La qualità globale della rappresentazione dei campioni, in relazione alle variabili ambientali analizzate, nel piano definito dalle PC1 e PC2, è molto buona (spiega il 92,3 % della variazione totale). Tale risultato era in buona parte atteso, dal momento che il numero di variabili di partenza si presentava molto basso. La PC1 risulta nettamente la più importante, in quanto spiega quasi il 60% della variazione totale.

Osservando i valori dei coefficienti delle combinazioni lineari che definiscono le prime due PC (Tab. 5.7), risulta che le variabili CE e contenuto d'acqua contribuiscono (con segno positivo) in misura preponderante al primo asse (PC1), mentre la variabile pH contribuisce (con segno negativo) in misura prevalente al secondo asse (PC2).

Tab. 5.7. Valori dei coefficienti associati alle variabili nella combinazione lineare per definire il nuovo sistema cartesiano (in rosso quelli che contribuiscono maggiormente a ciascuna PC).

Variabile	PC1	PC2
CE	0,701	0,073
pH	0,171	-0,983
Contenuto d'acqua	0,693	0,169

Le variabili CE e contenuto in acqua, avendo coefficienti simili sulle due prime PC risultano quindi correlate tra loro. I campioni con un valore elevato sulla PC1 (cioè posti sulla destra del diagramma di ordinamento) hanno CE e contenuto idrico elevati. I campioni con valori elevati sulla PC2 (cioè in alto nel diagramma) hanno un basso pH e sono quindi più acidi rispetto agli altri. Come si può osservare nella Fig. 5.2, i campioni che appartengono alla stessa zona, si presentano piuttosto raggruppati tra loro, ad occupare una regione del piano di ordinamento abbastanza distinta rispetto ai campioni dell'altra zona; anche se è osservabile una certa sovrapposizione tra i due gruppi di punti. In particolare, i campioni della zona est hanno in media valori più elevati lungo la PC1 e non hanno mai valori elevati lungo la PC2. I campioni della zona ovest, invece, raggiungono sulla PC2 anche valori elevati.

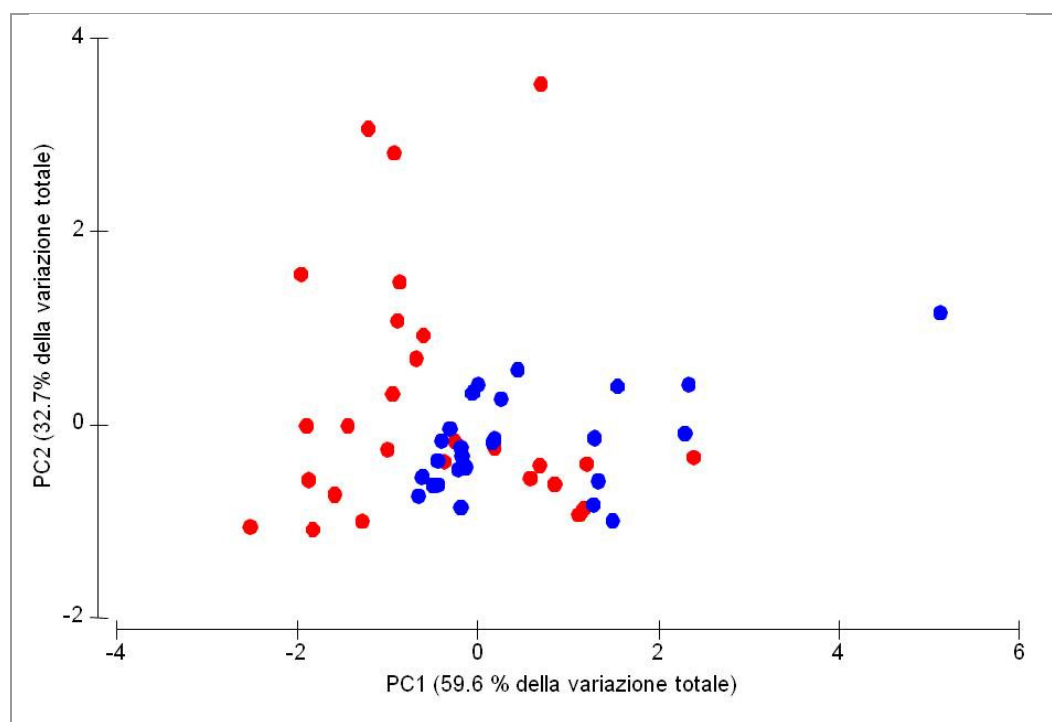


Fig. 5.2. Diagramma di ordinamento ottenuto applicando la PCA a tutti i campioni raccolti, considerando come variabili la CE, il pH e il contenuto d'acqua del suolo. In rosso sono indicati i campioni della zona ovest e in blu quelli della zona est.

La Tab. 5.8 riporta i risultati della PERMANOVA. Il livello di probabilità per il fattore zona è 0,1. Giacché per il test di questa sorgente di variazione sono possibili solo 10 permutazioni, questa probabilità è la più bassa di fatto misurabile. Da questa considerazione, si può ritenere che ci sia un'indicazione della presenza di un effetto di questo fattore, anche se la probabilità ottenuta è al di sopra del valore 0,05 normalmente ritenuto la soglia della significatività.

Risulta significativa l'interazione tra i fattori transetto e pedotipo, mentre non risulta significativa l'interazione tra zona e pedotipo. Questo indica che all'interno di ciascun transetto esistono differenze tra i pedotipi ma che l'effetto del pedotipo è diverso a seconda del transetto considerato; inoltre, non è possibile individuare un pattern delle differenze tra pedotipi che sia comune a tutti i transetti che appartengono alla stessa zona.

Tab. 5.8. Risultati del test PERMANOVA applicato ai dati CE, pH e contenuto d'acqua di tutti i campioni dei sei transetti esaminati (in rosso i valori di probabilità che indicano differenze significative).

Sorgente di variazione	df	SS	MS	Pseudo-F	P	Permutazioni
Zona	1	14,88	14,88	3,42	0,10	10
Pedotipo	2	56,64	28,32	12,11	0,001	9961
Transetto(Zona)	4	17,38	4,34	3,80	0,001	9928
Zona x Pedotipo	2	10,27	5,14	2,20	0,115	9951
Transetto x Pedotipo	8	18,70	2,34	2,05	0,011	9919

Le differenze rilevate dall'applicazione del test PERMANOVA sono state poi rappresentate tramite il diagramma di ordinamento ottenuto applicando la PCO alla matrice delle distanze euclidee dei centroidi delle stazioni. Nel diagramma (Fig. 5.3), i tre punti che rappresentano i campioni A, B e C di ogni stazione sono sostituiti da un unico punto, il loro centroide, rappresentato con un diverso colore a seconda del pedotipo a cui la stazione appartiene. Inoltre, le tre stazioni di uno stesso transetto sono collegate da frecce (rosse per i transetti della zona ovest, blu per quelli della zona est).

Anche se i sistemi di assi dei diagrammi alle Fig. 5.2 e 5.3 non sono esattamente gli stessi, è possibile basarsi sulla composizione delle PC (Fig. 5.2) per interpretare la relazione tra le variabili misurate e gli assi della Fig. 5.3. Da questo diagramma risulta evidente, come già nella Fig. 5.2, che le stazioni della zona est nel complesso tendono ad assumere valori più elevati lungo l'asse orizzontale (CE e contenuto in acqua elevati), mentre le stazioni della zona ovest raggiungono valori più elevati sull'asse verticale (pH più bassi). Questa

tendenza ad occupare regioni diverse del piano di ordinamento corrisponde all'indicazione fornita dalla PERMANOVA della presenza di un effetto del fattore zona.

I rapporti tra le stazioni appartenenti ad uno stesso transetto sono evidenziati dalle frecce tracciate sul diagramma. È possibile verificare che le stazioni con pedotipo Pirottolo sono sempre collocate alla destra del piano (CE e contenuto in acqua elevati), rispetto alle stazioni Cerba e S. Vitale. Al di là di questo elemento comune, le traiettorie che rappresentano i vari transetti hanno andamenti abbastanza diversi. L'aspetto più evidente in questo senso è il forte spostamento verso l'alto (bassi pH) delle stazioni Cerba dei transetti 1 e 2 che non ha corrispondenza negli altri transetti. Queste differenze corrispondono all'interazione significativa tra transetto e pedotipo. Il fatto che solo due dei tre transetti della zona ovest presentino lo spostamento lungo l'asse verticale delle stazioni Cerba corrisponde all'assenza di interazione tra zona e pedotipo.

Da notare, inoltre, che nella zona est, risultano molto simili i pedotipi Cerba e San Vitale, le cui stazioni risultano ravvicinate sul grafico.

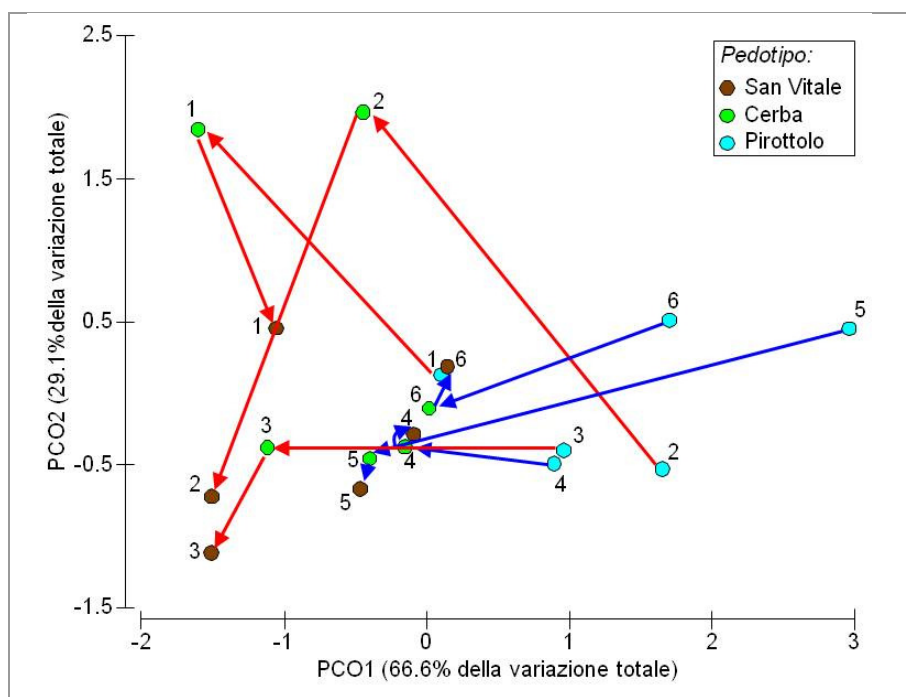


Fig. 5.3. Diagramma PCO dei centroidi delle stazioni, ottenuto a partire dalla matrice di distanze euclidee, considerando come variabili CE, pH e contenuto d'acqua del suolo. È evidenziato il pedotipo di ogni stazione (vedi legenda). I numeri indicano il transetto a cui ogni stazione appartiene. Le tre stazioni di uno stesso transetto sono collegate da frecce, rosse per i transetti della zona ovest, blu per quelli della zona est.

5.1.2 Caratteristiche chimiche e fisiche del suolo valutate sui campioni B

In Tab. 5.9 è riportato un quadro riassuntivo di alcune caratteristiche chimico fisiche relative ai campioni B, prelevati in corrispondenza dei tre pedotipi (San Vitale, SV; Cerba, CER; Pirottolo, PIR) lungo ciascun transetto.

Tab. 5.9. Caratteristiche chimico fisiche degli orizzonti A relativi ai campioni B.

Profilo	Prof.	Sabbia 2 - 0.05 mm	Limo 0.05 - 0.002 mm	Argilla < 0.002 mm	Tessitura	TOC	TKN	C/N
	cm	g/kg	g/kg	g/kg	USDA	g/kg	g/kg	
1SVB	0 - 25	871	71	58	SF	13,4	1,1	12
1CERB	0 - 12	861	79	60	SF	19,2	1,6	12
1PIRB	0 - 17	746	159	95	FS	23,5	2,5	9
2SVB	0 - 12	886	67	47	S	9,2	0,9	10
2CERB	0 - 13	823	100	76	SF	24,7	1,7	14
2PIRB	0 - 10	784	129	87	FS	54,0	5,4	10
3SVB	0 - 10	892	63	45	S	10,2	0,9	11
3CERB	0 - 10	886	57	58	S	16,8	1,4	12
3PIRB	0 - 10	641	214	144	FS	52,6	3,9	14
4SVB	0 - 20	868	69	64	SF	29,6	1,9	15
4CERB	0 - 15	836	106	57	SF	39,7	3,3	12
4PIRB	0 - 10	874	75	51	SF	36,4	3,5	10
5SVB	0 - 16	886	63	51	S	15,5	1,3	12
5CERB	0 - 11	831	106	63	SF	21,5	1,9	11
5PIRB	0 - 10	817	107	76	SF	29,9	3,0	10
6SVB	0 - 10	814	129	57	SF	29,8	2,0	15
6CERB	0 - 10	831	106	63	SF	19,0	1,6	12
6PIRB	0 - 10	771	147	82	FS	97,0	6,4	15

Osservando la Tab. 5.9, è possibile notare come tutti i suoli indagati presentino tessitura grossolana, con elevata percentuale di sabbia nella terra fine (min. 641 – max. 892 g/kg). Tuttavia, i suoli Pirottolo presentano generalmente un contenuto maggiore per quanto riguarda la componente argillosa. Il contenuto in carbonio organico risulta in genere elevato con valori compresi tra 9,2 e 97 g/kg. I valori maggiori si rinvencono generalmente in corrispondenza dei suoli Pirottolo. In questi suoli infatti, in virtù del manifestarsi di fenomeni di ristagno idrico, il processo di mineralizzazione della materia organica risulta in parte rallentato. I suoli San Vitale, che si sviluppano invece nelle posizioni più rilevate delle dune, presentano generalmente, all'interno dei relativi transetti, i valori di TOC più bassi. Analogo andamento è possibile rilevare in merito al contenuto in TKN. Il rapporto C/N manifesta deboli differenze tra i vari siti indagati, evidenziando valori compresi tra 9 e 15.

Nella Fig. 5.4 è riportato il grafico ottenuto con la PCA eseguita solo sui campioni B, considerando come variabili, oltre a CE, pH e contenuto d'acqua, le caratteristiche del suolo valutate solo su questi campioni e cioè: il contenuto di sabbia, limo e argilla, il TOC, il TKN e il rapporto C/N.

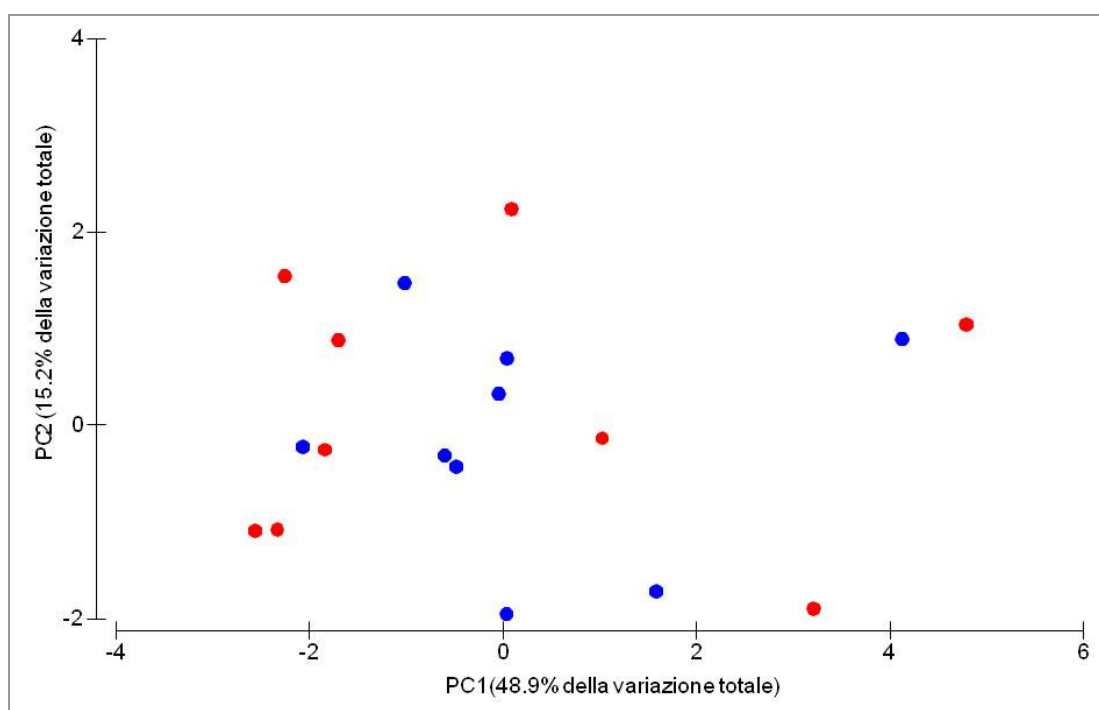


Fig. 5.4. Grafico della PCA in base al fattore zona, sui campioni B, considerando tutte le variabili abiotiche. In particolare, in rosso sono indicati i campioni riferiti alla zona ovest e in blu quelli della zona est.

La qualità globale della rappresentazione dei campioni, in relazione alle variabili ambientali analizzate, nel piano definito da PC1 e PC2 è abbastanza buona, anche se non completamente soddisfacente (spiega il 64,1% della variazione tra i campioni). La PC1 è di gran lunga la più rilevante, assorbendo quasi il 50% della variazione totale.

A differenza della PCA su tutti i campioni, realizzata utilizzando come variabili solo CE, pH e contenuto d'acqua, in questo caso i campioni che appartengono alla stessa zona sono distribuiti sull'intero spazio definito dalle due PC e non si osserva più una distinzione tra le due zone.

Osservando i valori dei coefficienti delle combinazioni lineari che definiscono le prime due PC (Tab. 5.10), risulta che il primo asse (PC1), è correlato a molte variabili e cioè: contenuto di sabbia, limo e argilla, TOC, TKN, CE e contenuto d'acqua. Viceversa, al secondo asse (PC2) contribuiscono in misura prevalente solo le variabili profondità dell'orizzonte A, C/N e pH.

Tab. 5.10. Valori dei coefficienti associati alle variabili nella combinazione lineare per definire il nuovo sistema cartesiano (in rosso quelli che contribuiscono maggiormente alla variabilità spiegata da ciascuna PC).

Variabile	PC1	PC2
Profondità orizzonte A	-0,165	0,392
Sabbia	-0,398	-0,151
Limo	0,396	0,131
Argilla	0,375	0,175
TOC	0,384	0,073
TKN	0,399	-0,111
C/N	0,083	0,624
CE	0,309	-0,211
pH	0,085	-0,558
Contenuto d'acqua	0,317	-0,114

Per valutare la significatività delle similarità o delle differenze osservate, anche in questo caso, è stato applicato il test statistico PERMANOVA. Tuttavia, esaminando solo i campioni B dei sei transetti, escludendo i campioni A e C, non è stato possibile valutare l'interazione del fattore pedotipo con il fattore transetto, ma solo la sua interazione con il fattore zona, poiché di fatto si ha un solo campione per ciascun tipo di suolo di ogni transetto.

Nella Tab. 5.11 sono illustrati i risultati dell'analisi; si osserva che sono state identificate differenze significative solo in base al fattore pedotipo.

Tab. 5.11. Risultati del test PERMANOVA applicato ai dati abiotici dei campioni B dei sei transetti esaminati (in rosso i valori di probabilità che indicano differenze significative).

Sorgente di variazione	df	SS	MS	Pseudo-F	P	Permutazioni
Zona	1	7,76	7,76	1,06	0,51	10
Pedotipo	2	68,31	34,15	5,90	0,002	9947
Transetto (Zona)	4	29,16	7,29	1,26	0,260	9918
Zona x Pedotipo	2	18,43	9,21	1,59	0,161	9925

Il valore di probabilità del fattore zona, anche tenendo conto del basso numero di permutazioni disponibili, è talmente elevato da escludere la presenza di un effetto significativo. Pertanto, si può affermare che le differenze tra campioni sono associate esclusivamente al pedotipo. Non essendo emerse differenze associate all'interazione del fattore pedotipo con il fattore zona, non emergono delle differenze sistematiche tra le due zone nel gradiente che intercorre dal suolo Pirottolo al suolo San Vitale.

Le differenze tra pedotipi rilevate come significative possono essere visualizzate sul grafico della PCA, in cui i pedotipi stessi sono rappresentati da punti di colore diverso (Fig. 5.5). In questo caso, ogni stazione è rappresentata non dal centroide di tre campioni ma dall'unico campione disponibile.

Su tale rappresentazione, si evidenzia lungo la PC1 la separazione dei suoli Pirottolo (valori più elevati sulla destra del grafico), rispetto ai suoli Cerba e San Vitale, che risultano più ravvicinati e frammisti tra loro. Sulla base dei coefficienti della combinazione lineare che definisce questa componente, i campioni PIR risultano caratterizzati da una tessitura meno sabbiosa e da un maggior contenuto sia di carbonio che di azoto organico (oltre che da conducibilità e contenuto in acqua elevati, come già evidenziato dall'analisi su tutti i campioni).

Lo stesso non accade lungo l'asse definito dalla PC2, sebbene si individuino alcuni suoli Pirottolo in corrispondenza di bassi valori per queste variabili, associati all'elevato rapporto C/N che li caratterizza e che influisce maggiormente su questo asse.

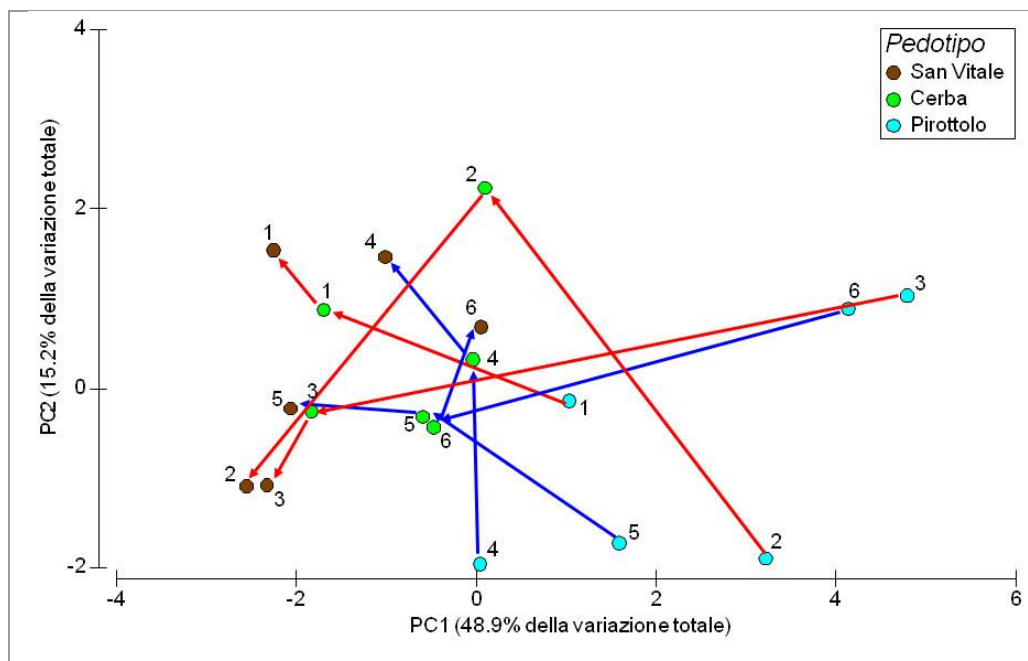


Fig. 5.5. Diagramma PCA dei campioni B, ottenuto a partire dalla matrice di distanze euclidee, considerando tutte le variabili abiotiche. È evidenziato il pedotipo di ogni stazione (vedi legenda). I numeri indicano il transetto a cui ogni stazione appartiene. Le tre stazioni di uno stesso transetto sono collegate da frecce, rosse per i transetti della zona ovest, blu per quelli della zona est.

Le differenze tra le traiettorie, che collegano tra loro i campioni di uno stesso transetto, suggeriscono la presenza d'interazione tra i fattori pedotipo e transetto, che però, come già evidenziato, in questo caso non può essere valutata statisticamente.

5.1.3 Le forme di humus valutate sui campioni B

Sulla base di quanto riportato in Zanella *et al.* (2011) si è proceduto alla identificazione in campo di orizzonti diagnostici per ognuno dei 18 siti indagati.

Nelle Tab. 5.12; 5.13; 5.14 viene proposta la descrizione morfologica di ogni sito indagato. I codici impiegati nella designazione degli orizzonti sono tratti da Zanella *et al.* (2011) ed il significato è riassunto in Tab. 5.15.

Tab. 5.12. Descrizione morfologica degli orizzonti superficiali dei suoli Pirottolo.

1PIRB		2PIRB		3PIRB	
0-1 cm	OLvg	0-2 cm	OLv(g)	0-3 cm	OLv(g)
1-3 cm	OFzog	2-4 cm	OFzo(g)	3-4 cm	OFzo(g)
3-4 cm	(OH)g meAg		meAg		meAg
4PIRB		5PIRB		6PIRB	
0-1 cm	OLv(g)	0-1 cm	OLvg	0-3 cm	OLvg
1-2 cm	OFzo(g) meAg	1-2 cm	OFzog	3-7 cm	OFzog
		2-4 cm	OHg meAg	7-9 cm	OHg meAg

Tab. 5.13. Descrizione morfologica degli orizzonti superficiali dei suoli Cerba.

1CERB		2CERB		3CERB	
0-1 cm	OLn	0-1 cm	OLn	0-1 cm	OLn
1-2 cm	OLv	1-2 cm	OLv	1-4 cm	OLv
2-3 cm	(OFzo) meA miA	2-6 cm	OFzo	4-6 cm	OFzo
		6-7 cm	(OH) meA miA	6-8 cm	OH meA miA
4CERB		5CERB		6CERB	
0-2 cm	OLv	0-2 cm	OLv	0-1 cm	OLv
2-3 cm	OFzo	2-4 cm	OFzo	1-2 cm	OFzo
3-4 cm	(OH) meA miA	4-5 cm	(OH) meA miA	2-3 cm	OH meA miA

Tab. 5.14. Descrizione morfologica degli orizzonti superficiali dei suoli San Vitale.

1SVB		2SVB		3SVB	
0-2 cm	OLv	0-2 cm	OLv	0-1 cm	OLv
2-8 cm	OFzo	2-4 cm	OFzo	1-5 cm	OFzo
8-9 cm	(OH) meA miA	4-5 cm	(OH) meA miA	5-6 cm	(OH) meA miA
4SVB		5SVB		6SVB	
0-4 cm	OLv	0-2 cm	OLv	0-2 cm	OLv
4-6 cm	OFzo	2-4 cm	OFzo	2-5 cm	OFzo
6-8 cm	OH meA miA	4-5 cm	(OH) meA miA	5-7 cm	(OH) meA miA

Tab. 5.15. Legenda delle sigle impiegate nella identificazione degli orizzonti diagnostici principali (da Zanella *et al.*, 2011).

Sigla	Suffisso	Descrizione	Note
O		Identifica gli orizzonti organici, caratterizzati da % diverse di residui riconoscibili e da composti humici. Sulla base della % si distinguono 3 diversi orizzonti diagnostici (OL, OF, OH).	
OL		(L = lettiera) L'orizzonte è costituito dall'accumulo di foglie, aghi, ramoscelli, riconoscibili ad occhio nudo. La frazione umica è < 10%.	
	n	Lettiera nuova (n = nuova), con elementi né trasformati/decolorati, e neppure frammentati.	
	v	Lettiera più vecchia (v = vetusta), debolmente alterata, decolorata ed a volte debolmente frammentata.	
OF		L'orizzonte è costituito dall'accumulo di foglie, aghi, ramoscelli, frammentati, senza integrità (f = frammentata). La frazione umica è compresa tra 10% e 70%.	
	zo	Materiale zoogenico	
	noz	Materiale non zoogenico	
OH		(O = umificazione) L'orizzonte è caratterizzato dall'accumulo di materiale zoogenico, nero, bruno grigiastro, bruno, ben decomposto. La maggior parte del materiale non è riconoscibile. La frazione umica è > 70%.	
A		Orizzonte organo minerale, generalmente presente subito sotto gli orizzonti O, colorati dalla presenza di sostanza organica, sono generalmente più scuri degli orizzonti inferiori. In base alla struttura vengono distinti in 5 classi.	
	maA	Struttura granulare (> 2 mm), pH > 5; gli aggregati > 4 mm sono i più diffusi. ANECI-ENDOVERMIC [ANECIC - cunicoli verticali, foglie e suolo] [ENDOGEIC - cunicoli orizzontali, suolo]	(Zoogenico) Segni di attività animale sono escrementi, cunicoli, muco, spoglie animali.
	meA	Struttura granulare (1-5 mm); gli aggregati tra 1 e 4 mm sono i più diffusi. ENDO-EPIVERMIC [ENDOGEIC - cunicoli orizzontali, suolo] [EPIGEIC – nella lettiera]	
	miA	Struttura granulare (< 1 mm) pH < 5; gli aggregati < 1 mm sono i più diffusi. ENCHY-ARTHROPODIC [Enchitreidi] [Artropodi]	
	sgA	Struttura a grani singoli, pH < 5	(Non zoogenico) Mancano segni di attività animale, e possono essere presenti strutture fungine.
	msA	Struttura massiva, pH < 5	
	g	Indica la presenza di proprietà idromorfiche, conseguenti ad una saturazione idrica prolungata, ma inferiore a 6 mesi. I residui vegetali degli orizzonti O si presentano “incollati” tra loro, con colori scuri, soprattutto lungo le venature. Negli orizzonti A si evidenzia anossia temporanea, con screziature di colori aranciati/grigiastri/bluastri, conseguenti a diversi gradi di ossidazione del Fe.	
	()	Indica discontinuità nella presenza dell'orizzonte, o sua presenza in “tasche”. Può essere impiegato in tutti gli orizzonti O ed A.	

Sulla base di quanto osservato in campo e della relativa descrizione morfologica, è possibile avanzare una prima ipotesi sulle forme di humus individuate:

- **pedotipi Pirottolo**; alcune forme di humus sono state descritte in ambiente semiterrestre, interessato cioè da fenomeni di saturazione idrica se non addirittura di sommersione vera e propria. Questa condizione di vicinanza della falda freatica si verifica in ambienti in cui si rinviene il pedotipo Pirottolo (*Typic Psammaquents*). Tale fenomeno tuttavia è presumibile pensare che avvenga per periodi inferiori a 6 mesi all'anno. Gli orizzonti presentano, in maniera più o meno evidente, segni di proprietà idromorfiche (g), con impaccamento ed imbrunimento degli orizzonti organici (O) e presenza di screziature negli orizzonti organo minerali (A).

La chiave tassonomica colloca queste forme di humus all'interno del gruppo secondario degli *Hydro*-.

Osservando i profili morfologici, in alcuni casi (5PIRB, 6PIRB) è possibile osservare la presenza dell'orizzonte OH ben espresso e continuo mentre, in altri casi (1PIRB) questo è presente in forma discontinua, a tasche. Entrambe le situazioni, tuttavia, portano ad identificare in questi suoli la presenza della forma di humus definita come **Hydroamphi** (Fig. 5.6), dal momento che il pH risulta sempre > 5 e l'orizzonte OH non presenta mai uno spessore doppio rispetto a quello dell'orizzonte A. In questo caso la probabile sommersione completa del suolo e della lettiera costituisce un fattore limitante alla decomposizione della materia organica con conseguente comparsa di orizzonte OH.

In altri casi (2PIRB, 3PIRB, 4PIRB) non è stato osservato l'orizzonte OH per cui la forma di humus individuata risulta essere quella definita come **Hydromull**. In questo caso è presumibile pensare che non si verifichi una sommersione completa della lettiera e perciò avviene una incorporazione della stessa all'interno dell'orizzonte A, senza formazione di orizzonte OH.

Fig. 5.6. Tavola sinottica di classificazione degli Hydroforms. In colore grigio le possibili presenze degli orizzonti diagnostici all'interno di ogni tipo biologico di humus (da Zanella *et al.*, 2011).

Diagnostic horizons	HYDRO				
	TANGEL	AMPHI	MULL	MODER	MOR
OL(g)			possible		
OFnoz(g)					
OFzo(g)			disc. or pock.		
OH(g)					
Ag					
Anozg					possible
AEg					
pH(A) _{water}	pH ≥ 5			pH < 5	

- **pedotipi Cerba e San Vitale**; alcune forme di humus sono state descritte in ambiente terrestre, ambiente mai interessato, in superficie, da fenomeni di saturazione idrica e tantomeno di sommersione.

Questa condizione di lontananza della falda freatica dalla superficie topografica del suolo corrisponde, nell'ambiente indagato, a due pedotipi distinti: Cerba (*Aquic Ustipsamments*) e San Vitale (*Typic Ustipsamments*).

La chiave tassonomica individua, all'interno del gruppo principale *Terrestrial*, il gruppo secondario *Enti*- il quale contempla le forme di humus denominate *Psammoforms*. Queste si sviluppano direttamente su substrati sciolti con frammenti del diametro < 2 mm che potrebbero rappresentare la situazione verificata nell'area indagata. Purtroppo, la medesima tassonomia indica uno spessore massimo dell'orizzonte A pari a 3 cm, situazione che non rispecchia quanto osservato in Pineta dove, l'orizzonte A presenta spessori maggiori.

A questo punto l'unica possibilità di collocazione di queste forme di humus risiede nel gruppo secondario *Terro*-.

Osservando i profili morfologici, in quasi tutti i siti, è stato individuato un orizzonte caratterizzato da accumulo zoogenico di materiale fortemente umificato (OH). La presenza di tale orizzonte, più o meno continuo, e tuttavia di spessore compreso tra 0 e 3 cm, conduce alla individuazione della forma di humus denominata ***Eumeso(Terro)Amphi*** (Fig. 5.7).

In un unico caso (1CERB) non è stato possibile individuare l'orizzonte OH e tale caratteristica consente di individuare la forma di humus denominata ***Oligo(Terro)Mull*** (Fig. 5.8).

Per i pedotipi Cerba e San Vitale, risulta perciò una notevole omogeneità di forme di humus presenti. Tale situazione è giustificata dal fatto che l'ambiente in cui si originano questi due pedotipi risulta di fatto assai omogeneo, andandosi a differenziare principalmente per la profondità a cui si ritrova la falda freatica. Per un unico sito (1CERB) non si è inteso rinvenire l'orizzonte OH e questo ha portato di conseguenza ad una diversa collocazione tassonomica.

Fig. 5.7. Tavola sinottica di classificazione degli *Amphi* (da Zanella *et al.*, 2011).

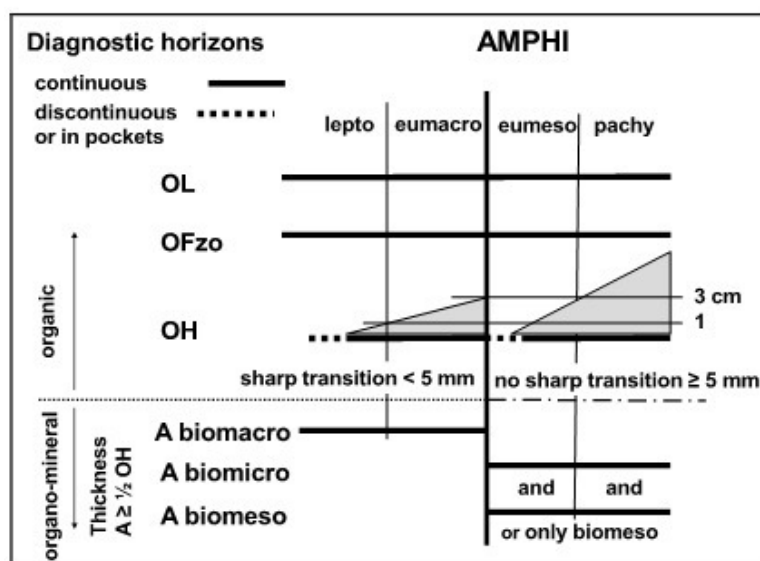
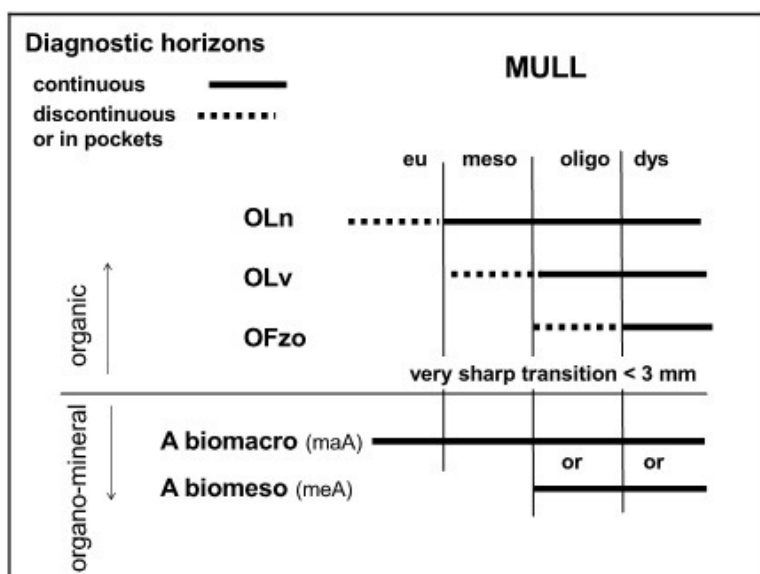


Fig. 5.8. Tavola sinottica di classificazione dei *Mull* (da Zanella *et al.*, 2011).



5.2 La pedofauna

5.2.1 Composizione del popolamento, valori dell'indice QBS-ar e classi di qualità del suolo

Nelle Tab. 5.16; 5.17; 5.18; 5.19; 5.20; 5.21 sono riportati i taxa di microartropodi del suolo rinvenuti nei nove campioni, prelevati in corrispondenza di ciascun transetto, e le relative densità numeriche (numero di individui per campione). Come già spiegato, alcuni taxa, nell'applicazione del QBS-ar sono ulteriormente suddivisi in forme biologiche,

gruppi che non hanno valore tassonomico, sulla base delle dimensioni o di altre caratteristiche morfologiche. Anche per questi taxa sono riportate comunque solo le densità totali. Le larve sono invece state mantenute distinte dagli adulti.

Tab. 5.16. Taxa di microartropodi del suolo e relative abbondanze, rinvenuti nei campioni prelevati lungo il transetto 1, sito nella parte meridionale della zona ovest.

TAXA	TRANSETTO 1								
	SAN VITALE			CERBA			PIROTTOLO		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Pseudoscorpioni	1								
Araneidi	2			1			1		2
Acari	26	51	22	40	10	16	33	45	53
Isopodi									
Diplopodi	11			6	3	2	1	1	
Sinfili									
Chilopodi	1								
Proturi						1	2		
Dipluri									
Collemboli	6	13	1	14	9	3	7	4	6
Psocotteri									
Emitteri									
Tisanotteri	1			1	1		1	1	1
Coleotteri				1		1		1	
Coleotteri (larve)		1		2	4		1		4
Imenotteri	2		3			1			
Imenotteri (larve)									
Ditteri									
Ditteri (larve)	2	7		6		3	4	7	
Lepidotteri (larve)							1		
Altri olometaboli	1								

Tab. 5.17. Taxa di microartropodi del suolo e relative abbondanze, rinvenuti nei campioni prelevati lungo il transetto 2, sito nella parte centrale della zona ovest.

TAXA	TRANSETTO 2								
	SAN VITALE			CERBA			PIROTTOLO		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Pseudoscorpioni						1			
Araneidi		3			4		1		2
Acari	8	8	98	22	74	80	23	13	116
Isopodi				1					
Diplopodi				1		1			
Sinfili									
Chilopodi				2	2				
Proturi	1		1						
Dipluri					1				
Collemboli	3	1	16	2	13	16	9	2	2
Psocotteri									
Emitteri									
Tisanotteri	1		2	1					1
Coleotteri			2	2	1	1	2		2
Coleotteri (larve)	3		3	1	1	1			2
Imenotteri				1	2		2		45
Imenotteri (larve)						61			
Ditteri			1						
Ditteri (larve)	17	8	29	8	19	16	5	1	2
Lepidotteri (larve)									
Altri olometaboli									

Tab. 5.18. Taxa di microartropodi del suolo e relative abbondanze, rinvenuti nei campioni prelevati lungo il transetto 3, sito nella parte settentrionale della zona ovest.

TAXA	TRANSETTO 3								
	SAN VITALE			CERBA			PIROTTOLO		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Pseudoscorpioni					1				2
Araneidi	1	1			1		1		1
Acari	14	90	15	19	166	74	17	46	53
Isopodi								1	3
Diplopodi	2	4			53	9			3
Sinfili									
Chilopodi									
Proturi				2	3		1		
Dipluri				1					
Collemboli	6	45	5	4	58	16	4	25	4
Psocotteri								3	
Emitteri									
Tisanotteri			1	1					
Coleotteri									1
Coleotteri (larve)				1	1	2	1		
Imenotteri	1	3	14	1		1	1	1	5
Imenotteri (larve)									
Ditteri			1				1		
Ditteri (larve)	1	7	3	2	10	2	2		4
Lepidotteri (larve)									
Altri olometaboli									

Tab. 5.19. Taxa di microartropodi del suolo e relative abbondanze, rinvenuti nei campioni prelevati lungo il transetto 4, sito nella parte settentrionale della zona est.

TAXA	TRANSETTO 4								
	SAN VITALE			CERBA			PIROTTOLO		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Pseudoscorpioni			1					2	
Araneidi	3	2	2			1		1	1
Acari	69	119	64	27	23	22	30	41	33
Isopodi									2
Diplopodi	3	5	1	1	3	1	2	2	10
Sinfili				1		1	2		1
Chilopodi									
Proturi		1	2		2	2	5	4	4
Dipluri									
Collemboli	8	91	67	9	7	14	34	8	28
Psocotteri									
Emitteri									
Tisanotteri	1	2	1	4					
Coleotteri	1	1	1			3		2	2
Coleotteri (larve)		1	1						2
Imenotteri								1	29
Imenotteri (larve)									2
Ditteri									2
Ditteri (larve)	3	10	3	1	10		1	1	
Lepidotteri (larve)									
Altri olometaboli									

Tab. 5.20. Taxa di microartropodi del suolo e relative abbondanze, rinvenuti nei campioni prelevati lungo il transetto 5, sito nella parte centrale della zona est.

TAXA	TRANSETTO 5								
	SAN VITALE			CERBA			PIROTTOLO		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Pseudoscorpioni								1	
Araneidi				2	1	1	1		1
Acari	21	44	17	24	29	81	334	15	152
Isopodi							4	4	
Diplopodi		7	1	4	2	6			
Sinfili	1			1		1	6	1	
Chilopodi									
Proturi	2	3		1	2	1	4		
Dipluri									
Collemboli	21	53	41	51	31	15	44	12	281
Psocotteri									
Emitteri									
Tisanotteri	2	7	1			1	1		
Coleotteri	1					2	1	2	2
Coleotteri (larve)					1				4
Imenotteri		1		4		12			
Imenotteri (larve)									
Ditteri								1	1
Ditteri (larve)	7	7	3	12	3	5	14	3	10
Lepidotteri (larve)									
Altri olometaboli									

Tab. 5.21. Taxa di microartropodi del suolo e relative abbondanze, rinvenuti nei campioni prelevati lungo il transetto 6, sito nella parte meridionale della zona est.

TAXA	TRANSETTO 6								
	SAN VITALE			CERBA			PIROTTOLO		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Pseudoscorpioni	1		1						
Araneidi	2	1		1		1	2		
Acari	89	75	27	52	71	45	59	1420	301
Isopodi									
Diplopodi	5	1	1		1	2		1	
Sinfili			1						
Chilopodi									2
Proturi	2					1			
Dipluri									
Collemboli	17	51	25	17	12	37	25	73	24
Psocotteri				1					
Emitteri	1		1					1	
Tisanotteri	2	2	1	1		1		1	
Coleotteri				1	1		1		1
Coleotteri (larve)	2	1	4	1			1	1	
Imenotteri	76	1		1			1		5
Imenotteri (larve)	43								
Ditteri								2	
Ditteri (larve)	3	4		3	1	1		11	1
Lepidotteri (larve)									
Altri olometaboli									

I taxa sempre presenti per tutti i transetti sono acari, con *range* di abbondanza compreso tra 943 individui/m² (2SVA, 2SVB) e 167432 individui/m² (6PIRB), e collemboli, con *range* di abbondanza compreso tra 118 individui/m² (2SVB) e 10730 individui/m² (4SVB).

I gruppi in assoluto meno presenti sono lepidotteri (in forma larvale) ed emitteri, tre individui nel transetto 6. Inoltre, nel transetto 1 è stato rinvenuto un individuo che, anche a causa delle cattive condizioni di conservazione, non è stato possibile identificare; questo individuo è stato collocato nella categoria “altri olometaboli”.

Si osserva l’esistenza di differenze tra i campioni nella presenza/assenza ma anche nelle densità numeriche delle specie appartenenti ai differenti taxa. Ad esempio, si consideri la differenza tra i campioni 4PIRB e 4PIRC relativa al taxa imenotteri: il campione B ha presentato un solo individuo, mentre nel campione C sono stati individuati 29 individui.

A livello del numero totale di organismi individuati nei vari campioni, il *range* di abbondanza varia tra un minimo di 1887 individui/m² e un massimo di 178044 individui/m².

Nelle Tab. 5.22; 5.23; 5.24; 5.25; 5.26; 5.27 sono invece specificati i valori degli EMI relativi ai taxa dei microartropodi, estratti nei campioni di suolo delle tre stazioni di ogni transetto, e i relativi valori dell’indice QBS-ar. Il fatto che per alcuni taxa siano riportati

differenti valori di EMI nei diversi campioni dipende dalla presenza di diverse forme biologiche. Sono inoltre indicati i valori dell'indice QBS-ar max associati ad ogni stazione.

Tab. 5.22. Taxa dei microartropodi del suolo estratti dai campioni del transetto 1, con relativi valori di EMI e di QBS-ar e QBS-ar max.

Gruppi Tassonomici	TRANSETTO 1											
	SAN VITALE				CERBA				PIROTTOLO			
	A	B	C	QBS-ar max	A	B	C	QBS-ar max	A	B	C	QBS-ar max
Pseudoscorpioni	20			20								
Araneidi	1			1	5			5	5		5	5
Acari	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Isopodi												
Diplopodi	20			20	20	20	20	20	20	10		20
Sinfili												
Chilopodi	20			20								
Proturi							20	20	20			20
Dipluri												
Collemboli	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Psocotteri												
Emitteri												
Tisanotteri	1			1	1	1		1	1	1	1	1
Coleotteri					6		11	11		10		10
Coleotteri (larve)		10		10	10	10		10	10		10	10
Imenotteri	5		5	5			5	5				
Imenotteri (larve)												
Ditteri												
Ditteri (larve)	10	10		10	10		10	10	10	10		10
Lepidotteri (larve)									10			10
Altri olometaboli	1			1								
Totale	118	60	45	128	92	71	106	122	116	71	56	126

Tab. 5.23. Taxa dei microartropodi del suolo estratti dai campioni del transetto 2, con relativi valori di EMI e di QBS-ar e QBS-ar max.

Gruppi Tassonomici	TRANSETTO 2											
	SAN VITALE				CERBA				PIROTTOLO			
	A	B	C	QBS-ar max	A	B	C	QBS-ar max	A	B	C	QBS-ar max
Pseudoscorpioni							20	20				
Araneidi		1		1		5		5	5		5	5
Acari	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Isopodi					10			10				
Diplopodi					20		20	20				
Sinfili												
Chilopodi					20	20		20				
Proturi	20		20	20								
Dipluri						20		20				
Collemboli	20	8	20	20	20	20	20	20	20	4	10	20
Psocotteri												
Emitteri												
Tisanotteri	1		1	1	1			1			1	1
Coleotteri			11	11	11	1	10	11	6		6	6
Coleotteri (larve)	10		10	10	10	10	10	10			10	10
Imenotteri					5	5		5	5		5	5
Imenotteri (larve)							10	10				
Ditteri			1	1								
Ditteri (larve)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Lepidotteri (larve)												
Altri olometaboli												
Totale	81	39	93	94	127	111	120	182	66	34	67	77

Tab. 5.24. Taxa dei microartropodi del suolo estratti dai campioni del transetto 3, con relativi valori di EMI e di QBS-ar e QBS-ar max.

Gruppi Tassonomici	TRANSETTO 3											
	SAN VITALE				CERBA				PIROTTOLO			
	A	B	C	QBS-ar max	A	B	C	QBS-ar max	A	B	C	QBS-ar max
Pseudoscorpioni						20		20			20	20
Araneidi	1	1		1		5		5	1		1	1
Acari	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Isopodi										10	10	10
Diplopodi	20	20		20		20	20	20			10	10
Sinfili												
Chilopodi												
Proturi					20	20		20	20			20
Dipluri					20			20				
Collemboli	20	20	20	20	20	20	20	20	10	20	10	20
Psocotteri										1		1
Emitteri												
Tisanotteri			1	1	1			1				
Coleotteri											6	6
Coleotteri (larve)					10	10	10	10	10			10
Imenotteri	5	5	5	5	5		5	5	5	5	5	5
Imenotteri (larve)												
Ditteri												
Ditteri (larve)	10	10	10	10	10	10	10	10	10		10	10
Lepidotteri (larve)												
Altri olometaboli												
Totale	76	76	56	77	106	125	85	151	76	56	92	133

Tab. 5.25. Taxa dei microartropodi del suolo estratti dai campioni del transetto 4, con relativi valori di EMI e di QBS-ar e QBS-ar max.

Gruppi Tassonomici	TRANSETTO 4											
	SAN VITALE				CERBA				PIROTTOLO			
	A	B	C	QBS-ar max	A	B	C	QBS-ar max	A	B	C	QBS-ar max
Pseudoscorpioni			20	20						20		20
Araneidi	5	5	5	5			5	5		5	5	5
Acari	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Isopodi											10	10
Diplopodi	20	20	20	20	10	20	10	20	10	20	20	20
Sinfili					20		20	20	20		20	20
Chilopodi												
Proturi		20	20	20		20	20	20	20	20	20	20
Dipluri												
Collemboli	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Psocotteri												
Emitteri												
Tisanotteri	1	1	1	1	1			1				
Coleotteri	11	1	11	11			15	15		11	6	11
Coleotteri (larve)		10	10	10							10	10
Imenotteri										5	5	5
Imenotteri (larve)											10	10
Ditteri											1	1
Ditteri (larve)	10	10	10	10	10	10		10	10	10		10
Lepidotteri (larve)												
Altri olometaboli												
Totale	87	107	137	137	81	90	110	131	100	131	147	182

Tab. 5.26. Taxa dei microartropodi del suolo estratti dai campioni del transetto 5, con relativi valori di EMI e di QBS-ar e QBS-ar max.

Gruppi Tassonomici	TRANSETTO 5											
	SAN VITALE				CERBA				PIROTTOLO			
	A	B	C	QBS-ar max	A	B	C	QBS-ar max	A	B	C	QBS-ar max
Pseudoscorpioni										20		20
Araneidi					5	5	5	5	5		5	5
Acari	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Isopodi									10	10		10
Diplopodi	0	10	20	20	20	20	20	20				
Sinfili	20			20	20		20	20	20	20		20
Chilopodi												
Proturi	20	20		20	20	20	20	20	20			20
Dipluri												
Collemboli	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Psocotteri												
Emitteri												
Tisanotteri	1	1	1	1			1	1	1			1
Coleotteri	11			11			15	15	1	15	15	15
Coleotteri (larve)						10		10			10	10
Imenotteri		5		5	5		5	5				
Imenotteri (larve)												
Ditteri												
Ditteri (larve)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Lepidotteri (larve)												
Altri olometaboli												
Totale	102	86	71	127	120	105	136	146	107	115	80	151

Tab. 5.27. Taxa dei microartropodi del suolo estratti dai campioni del transetto 6, con relativi valori di EMI e di QBS-ar e QBS-ar max.

Gruppi Tassonomici	TRANSETTO 6											
	SAN VITALE				CERBA				PIROTTOLO			
	A	B	C	QBS-ar max	A	B	C	QBS-ar max	A	B	C	QBS-ar max
Pseudoscorpioni	20		20	20								
Araneidi	5	5		5	5		5	5	5			5
Acari	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Isopodi												
Diplopodi	20	10	10	20		20	20	20		10		10
Sinfili			20	20								
Chilopodi											20	20
Proturi	20			20			20	20				
Dipluri												
Collemboli	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Psocotteri					1			1				
Emitteri	1		1	1						1		1
Tisanotteri	1	1	1	1	1		1	1		1		1
Coleotteri					1	6		6	6		1	6
Coleotteri (larve)	10	10	10	10	10			10	10	10		10
Imenotteri	5	5	5	5	5			5	1		5	5
Imenotteri (larve)	10			10								
Ditteri												
Ditteri (larve)	10	10		10	10	10	10	10		10	10	10
Lepidotteri (larve)												
Altri olometaboli												
Totale	142	81	107	162	73	76	96	118	62	72	76	108

Applicando il sistema di valutazione descritto da Parisi (2001) e in seguito modificato da D'Avino (2002), sulla base dei valori di QBS-ar ottenuti, sono state definite le classi di qualità del suolo per i sei transetti, riportate nella Tab. 5.28.

Tab. 5.28. Classi di qualità dei suoli esaminati nei sei transetti.

Zona	Transetto	Pedotipo		
		San Vitale	Cerba	Pirottolo
Ovest	1	5	6	6
	2	6	5	3
	3	4	6	6
Est	4	6	6	6
	5	6	6	6
	6	6	6	5

La qualità biologica dei suoli risulta buona in molte stazioni, infatti, considerando la divisione in classi, ben 13 stazioni su 18 raggiungono la classe 6.

Le altre stazioni presentano valori corrispondenti alla classe 3, stazione 2PIR, classe 4, stazione 3SV, e classe 5, rispettivamente stazioni 1SV, stazione 2CER e stazione 6PIR.

Anche come valori assoluti dell'indice QBS-ar la maggior parte dei punti di campionamento raggiunge un punteggio superiore a 100. Solo tre stazioni, tutte appartenenti alla zona ovest (2SV, 3SV e 2PIR) assumono valori inferiori a 100.

Si osserva così una certa differenza tra le due zone considerando l'insieme delle stazioni: la zona ovest ha una qualità biologica media dei suoli un po' inferiore rispetto a quella dei suoli della zona est.

Durante la fase di riconoscimento dei taxa dei microartropodi definiti dal metodo QBS-ar, sono stati raccolti e conteggiati anche gli individui appartenenti alla classe Oligochaeta, quale ulteriore elemento distintivo tra campioni. Nella Tab. 5.29 sono riportate le abbondanze relative a questo taxa nei campioni di suolo prelevati dai sei transetti.

Tab. 5.29. Abbondanze del taxa Oligocheti nei campioni di suoli prelevati dai sei transetti.

Zona	Transetto	Pedotipo								
		San Vitale			Cerba			Pirottolo		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
Ovest	1	4	43	0	12	40	0	46	81	6
	2	6	6	16	4	0	4	0	0	0
	3	0	0	0	0	1	6	0	1	17
Est	4	19	9	4	0	12	0	0	0	2
	5	1	7	1	7	0	3	3	0	5
	6	105	7	2	7	7	1	5	3	0

5.2.2 Analisi multivariata della struttura del popolamento

La Fig. 5.9, riporta il diagramma di ordinamento ottenuto applicando la PCO alle abbondanze dei taxa identificati, secondo la procedura già illustrata nel paragrafo 4.9.4. La prima coordinata principale (PCO1) rappresenta il 26,8% della variazione totale e la seconda (PCO2) il 17%. Emerge dunque che la variazione rappresentata dall'insieme delle due coordinate principali sia piuttosto contenuta, corrispondente a meno del 44% della variazione totale. Tale risultato può essere spiegato dal numero elevato di variabili esaminate e dalla loro scarsa correlazione reciproca.

Inoltre, la Fig. 5.9 illustra la disposizione dei campioni (punti) sul piano di ordinamento, identificati in base al fattore zona. Si osserva un'ampia area di sovrapposizione tra le

distribuzioni dei campioni delle due zone nella parte in alto a destra del grafico. Tuttavia, si osservano due code, rispettivamente, in basso a sinistra per i campioni appartenenti alla zona ovest e in basso a destra per quelli della zona est. Quindi, si può affermare che, mentre i campioni della zona est tendono ad essere raggruppati in corrispondenza di valori elevati della PCO1, i campioni della zona ovest sono maggiormente distribuiti lungo questo asse, assumendo anche valori più bassi.

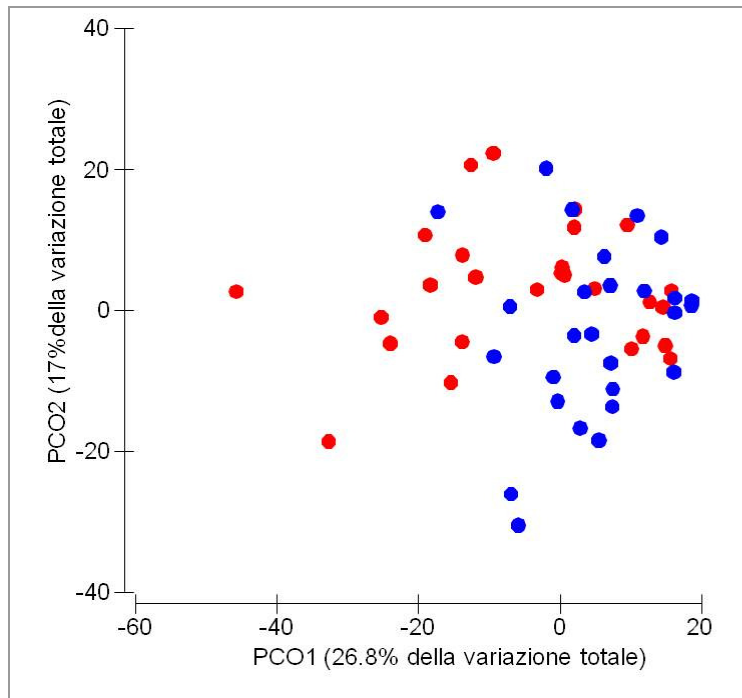


Fig. 5.9. Diagramma di ordinamento ottenuto applicando la PCO a tutti i campioni raccolti, considerando le variabili biologiche esaminate. In rosso sono indicati i campioni della zona ovest e in blu quelli della zona est.

Per una visione più completa viene riportato lo stesso diagramma, rappresentando i campioni in base al fattore pedotipo (Fig. 5.10).

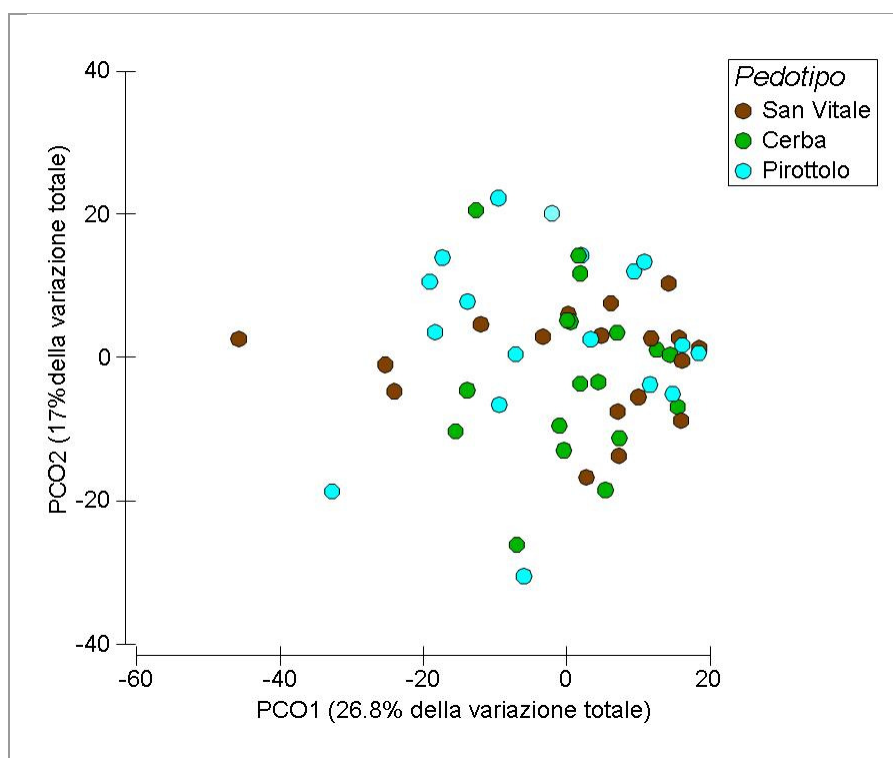


Fig. 5.10. Diagramma di ordinamento ottenuto applicando la PCO a tutti i campioni raccolti, considerando le variabili biologiche esaminate. I campioni sono indicati in base al fattore pedotipo.

La Tab. 5.30 riporta i risultati della PERMANOVA. Il livello di probabilità per il fattore zona è 0,1. A causa del basso numero di permutazioni possibili, come già spiegato per i dati abiotici, si può ritenere che questo valore fornisca comunque un'indicazione della presenza di un effetto dovuto a questo fattore.

Tab. 5.30. Risultati del test PERMANOVA applicato ai dati biologici di tutti i campioni dei sei transetti esaminati (in rosso i valori di probabilità che indicano differenze significative).

Sorgente di variazione	df	SS	MS	Pseudo-F	P	Permutazioni
Zona	1	2891	2891	2,56	0,10	10
Pedotipo	2	1709,7	854,84	0,96	0,491	9929
Transetto(Zona)	4	4519,7	1129,9	1,97	0,004	9906
Zona x Pedotipo	2	1740,6	870,28	0,98	0,457	9927
Transetto x Pedotipo	8	7122,2	890	1,55	0,023	9886

Analogamente a quanto verificato per le caratteristiche chimiche e fisiche del suolo, risulta significativa l'interazione tra i fattori transetto e pedotipo, mentre non risulta significativa l'interazione tra zona e pedotipo. Le differenze rilevate dall'applicazione del test statistico PERMANOVA sono state poi rappresentate tramite l'applicazione della PCO alla matrice di distanze di Bray-Curtis tra i centroidi di ogni stazione (Fig. 5.11).

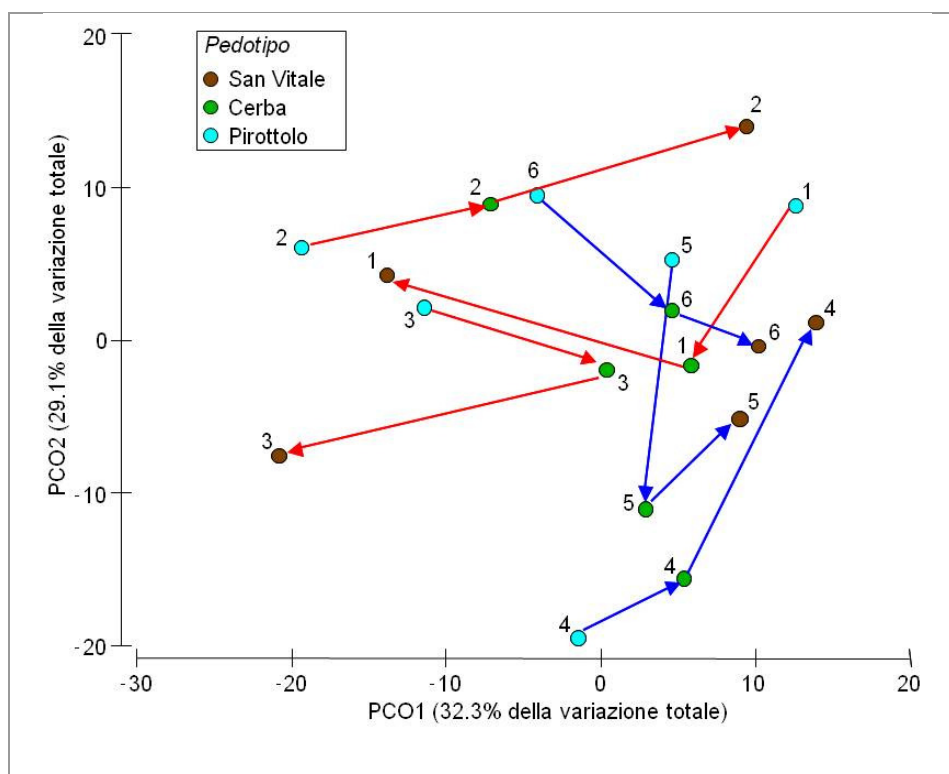


Fig. 5.11. Diagramma PCO dei centroidi delle stazioni, ottenuto a partire dalla matrice di distanze di Bray-Curtis, considerando le variabili biologiche. È evidenziato il pedotipo di ogni stazione (vedi legenda). I numeri indicano il transetto a cui ogni stazione appartiene. Le tre stazioni di uno stesso transetto sono collegate da frecce, rosse per i transesti della zona ovest, blu per quelli della zona est.

Analizzando più attentamente il grafico della Fig. 5.11, in linea con quanto emerso dall'analisi statistica PERMANOVA, si osserva che i transesti non conservano le stesse distanze tra i loro pedotipi ma i rapporti tra questi variano a seconda del transetto, così come variano le traiettorie associate ai transesti. Dunque, non solo ci sono differenze tra transesti, ma anche l'andamento tra i suoli all'interno di ciascun transetto è diverso. Così, capita ad esempio che il suolo Pirottolo del transetto 3 sia più simile al suolo San Vitale del transetto 1 che non al suolo Pirottolo del transetto 2 o ai suoli Cerba e San Vitale del suo stesso transetto. Questa eterogeneità tra le traiettorie dei transesti nel piano di ordinamento trova corrispondenza nella significativa interazione tra pedotipo e transetto.

Dal momento che la PCO, contrariamente alla PCA, non definisce gli assi di ordinamento sulla base delle variabili misurate (in questo caso abbondanza dei singoli taxa), l'interpretazione del significato degli assi può essere effettuata solo a posteriori. A questo scopo sono stati utilizzati i grafici a bolle, sovrapponendo al diagramma della PCO, le abbondanze di singoli taxa. Nelle Fig. 5.12; 5.13; 5.14; 5.15; 5.16 sono riportati i grafici risultanti.

In generale, accade che quasi tutti i taxa siano più abbondanti (bolle dal diametro maggiore) nella zona in alto a destra di ciascun grafico definendo perciò per i campioni posizionati in questa parte un popolamento più ricco, più abbondante. Questa è anche la parte del grafico della PCO dove si sovrappongono maggiormente i campioni delle due zone considerate.

Allo stesso tempo, si osservano alcune differenze. In particolare, collemboli e tisanotteri si presentano più abbondanti nella zona in basso a destra del grafico e sono tra i taxa più importanti nel determinare le differenze tra zona est e zona ovest.

La zona di minor sovrapposizione tra campioni, e caratterizzata da basse abbondanze per tutti i taxa considerati, risulta essere la porzione del grafico in alto a sinistra.

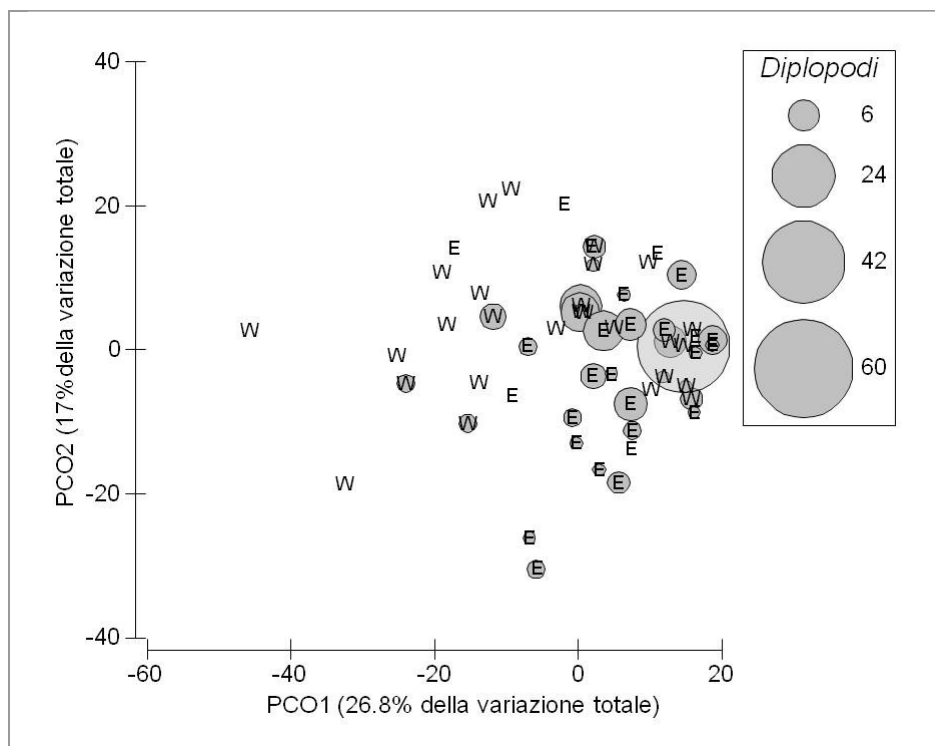


Fig. 5.12. Grafico a bolle dell'abbondanza della classe Diplopoda, sovrapposto al diagramma PCO di tutti i campioni raccolti rappresentati in base al fattore zona (W, zona ovest, e E, zona est), considerando le variabili biologiche esaminate.

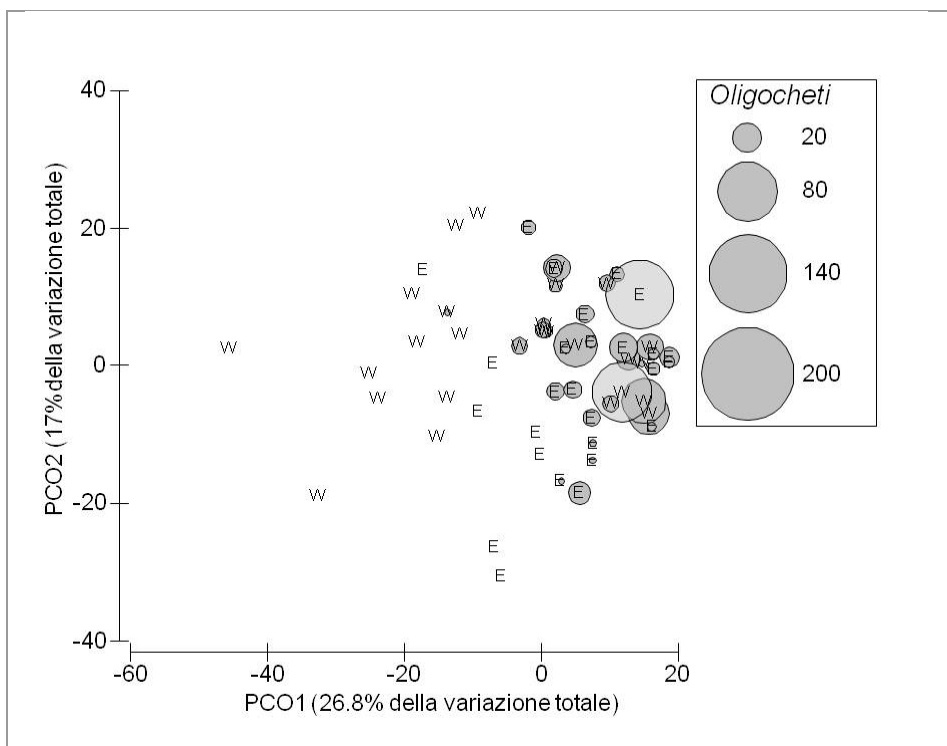


Fig. 5.13. Grafico a bolle dell'abbondanza della classe Oligochaeta, sovrapposto al diagramma PCO di tutti i campioni raccolti rappresentati in base al fattore zona (W, zona ovest, e E, zona est), considerando le variabili biologiche esaminate.

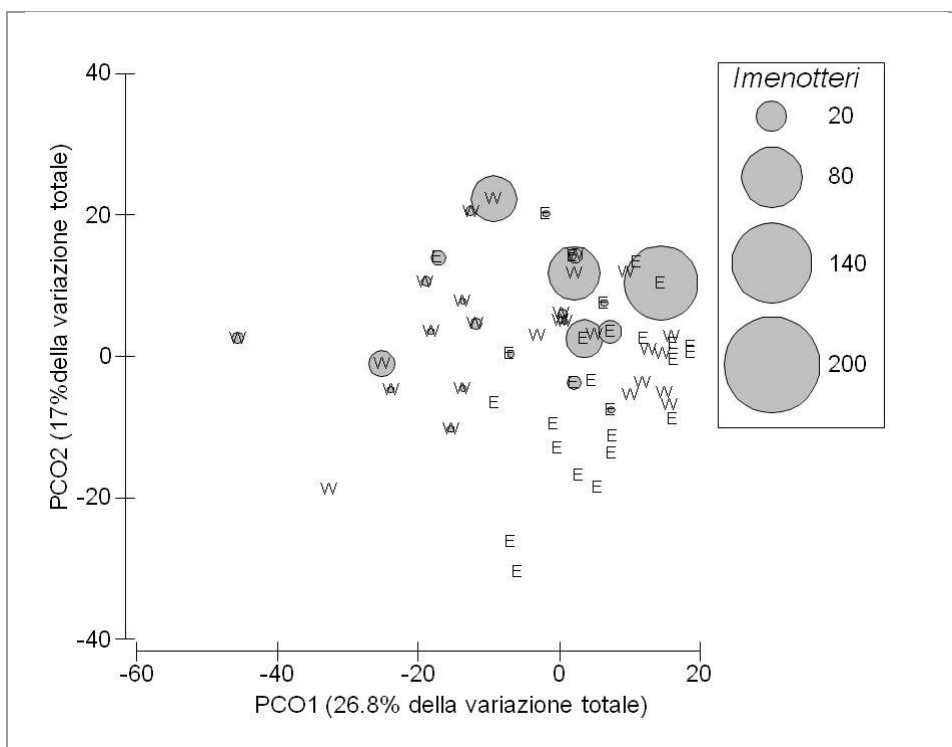


Fig. 5.14. Grafico a bolle dell'abbondanza della classe Hymenoptera, sovrapposto al diagramma PCO di tutti i campioni raccolti rappresentati in base al fattore zona (W, zona ovest, e E, zona est), considerando le variabili biologiche esaminate.

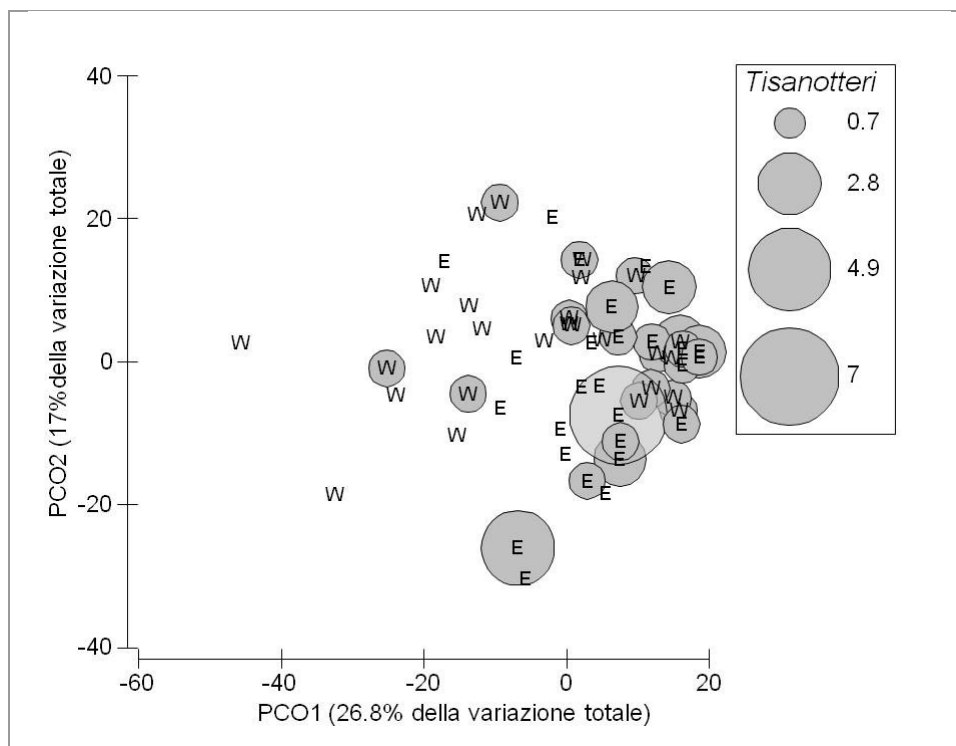


Fig. 5.15. Grafico a bolle dell'abbondanza della classe Thysanoptera, sovrapposto al diagramma PCO di tutti i campioni raccolti rappresentati in base al fattore zona (W, zona ovest, e E, zona est), considerando le variabili biologiche esaminate.

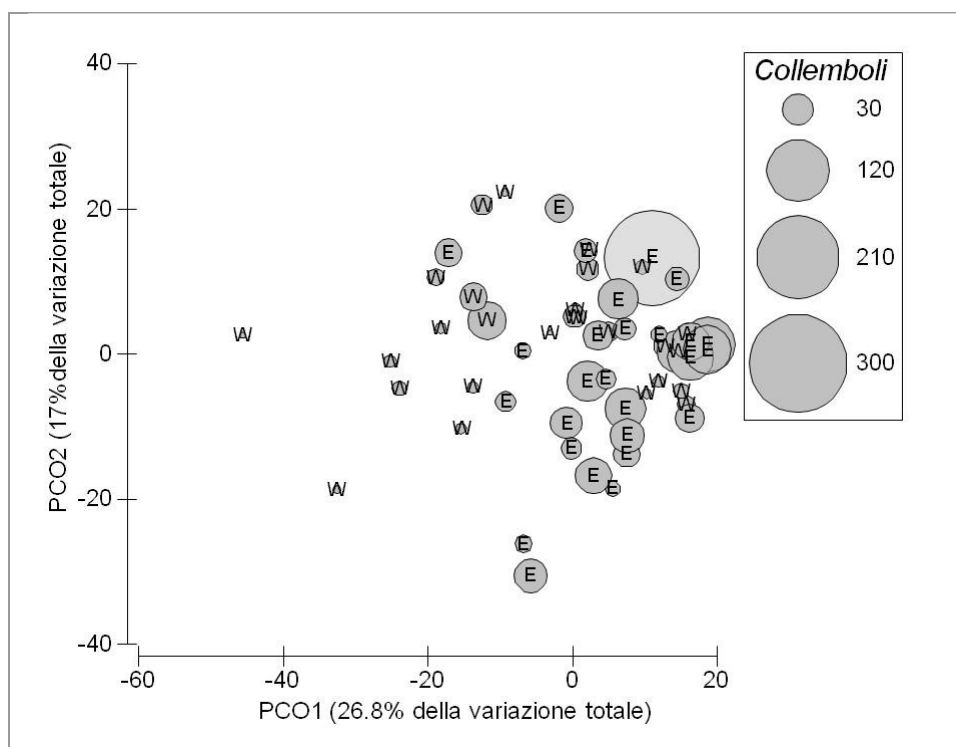


Fig. 5.16. Grafico a bolle dell'abbondanza della classe Collembola, sovrapposto al diagramma PCO di tutti i campioni raccolti rappresentati in base al fattore zona (W, zona ovest, e E, zona est), considerando le variabili biologiche esaminate.

5.3 Relazione tra caratteristiche chimico-fisiche e struttura del popolamento

Per valutare la correlazione tra struttura del popolamento e caratteristiche chimico-fisiche del suolo è stata utilizzata la tecnica BIOENV. L'applicazione di questa procedura a tutti i campioni, utilizzando come variabili abiotiche CE, pH e contenuto in acqua, ha individuato come combinazione che massimizza la correlazione con la struttura del popolamento, quella costituita dalle due variabili CE e contenuto in acqua. Il coefficiente di correlazione corrispondente è pari a 0,331, valore piuttosto basso, rispetto al massimo teorico pari a 1, che esprime quindi un modesto grado di associazione. Anche a causa del numero di campioni piuttosto elevato, la correlazione risulta comunque altamente significativa ($p = 0,0002$).

La relazione esistente tra il popolamento biologico e le due variabili abiotiche selezionate da BIOENV può essere visualizzata con i grafici a bolle riportati in Fig. 5.17; 5.18.

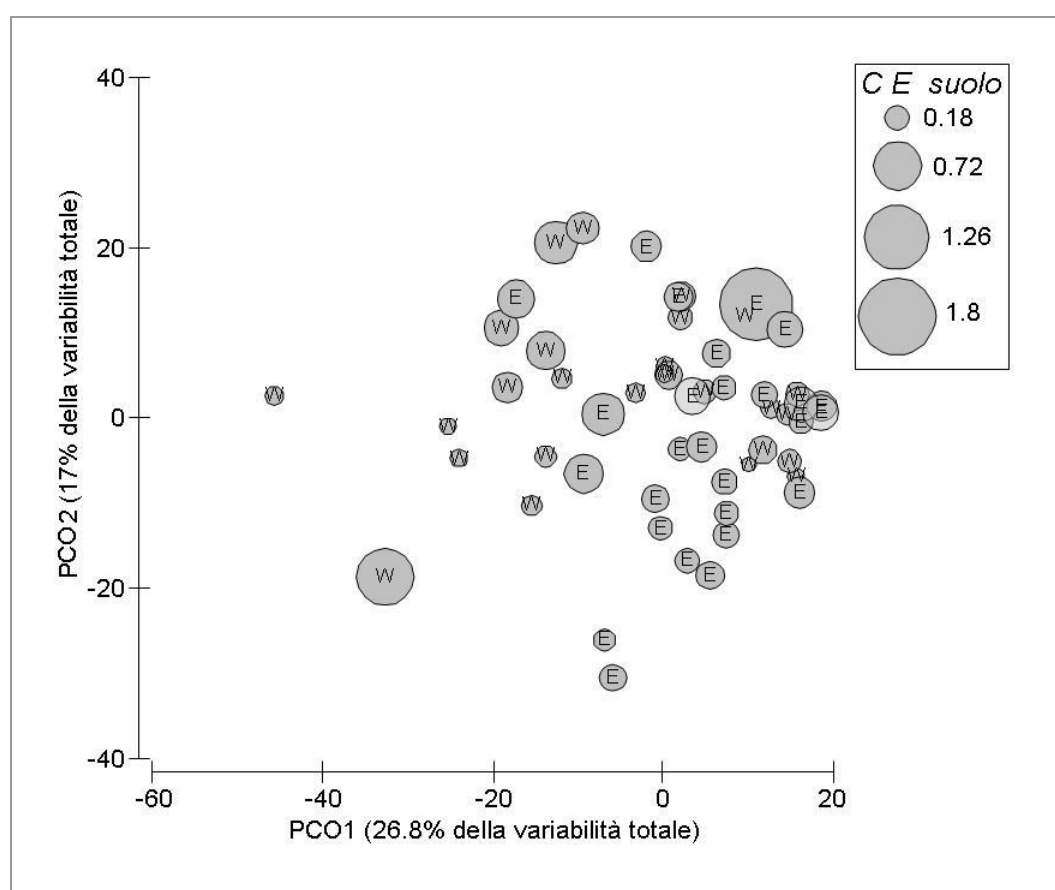


Fig. 5.17. Grafico a bolle della variabile CE, sovrapposto al diagramma PCO di tutti i campioni raccolti rappresentati in base al fattore zona (W, zona ovest, e E, zona est), considerando le variabili biologiche esaminate.

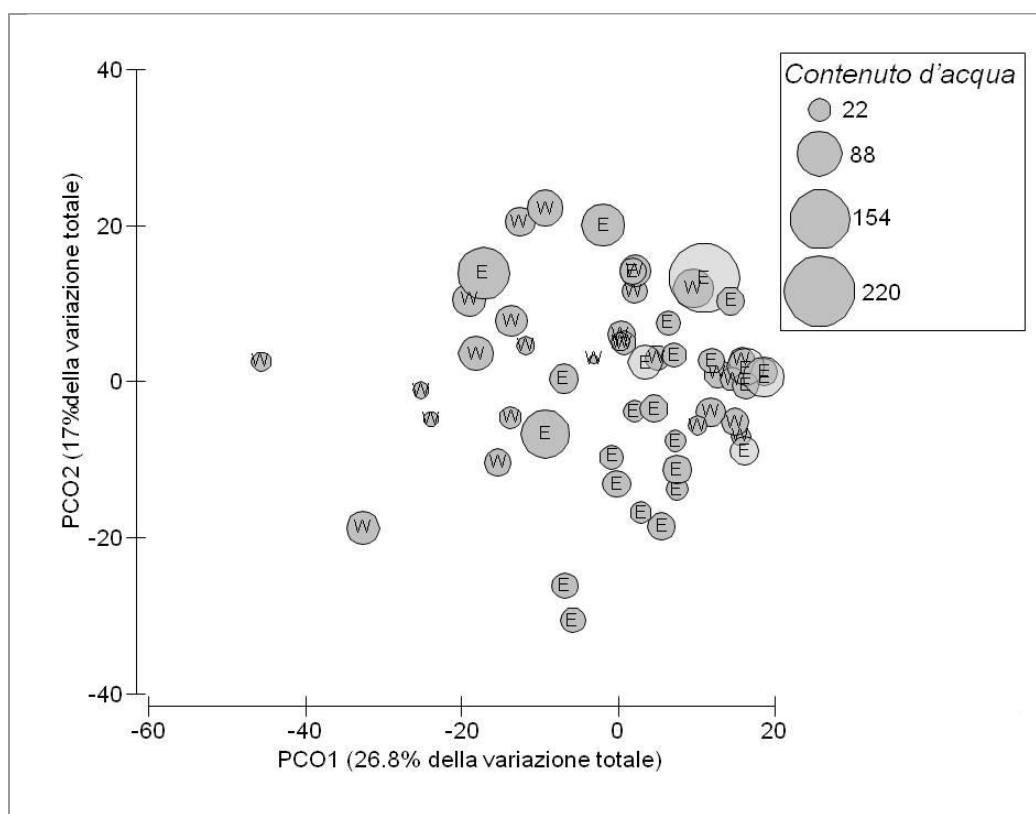


Fig. 5.18. Grafico a bolle della variabile contenuto d'acqua, sovrapposto al diagramma PCO di tutti i campioni raccolti rappresentati in base al fattore zona (W, zona ovest, e E, zona est), considerando le variabili biologiche esaminate.

Si osserva che, sebbene non vi sia una distinzione netta tra le bolle, quelle di maggiori dimensioni (corrispondenti a valori più elevati delle variabili abiotiche considerate) tendono a posizionarsi in entrambi i grafici nella parte in alto a destra, anche se in modo meno marcato per la CE.

Tali distribuzioni rispecchiano quelle relative alle abbondanze dei taxa, individuate applicando la stessa analisi, che si concentrano maggiormente nella stessa porzione del grafico (Fig. 5.12; 5.13; 5.14; 5.15; 5.16).

Dall'applicazione della procedura BIOENV ai soli campioni B, per i quali era disponibile un maggior numero di variabili abiotiche, risulta che la combinazione che massimizza la correlazione è data da contenuto di argilla, CE, pH e contenuto d'acqua. Il valore del coefficiente di correlazione per questa combinazione è pari a 0,668, che suggerisce un grado di associazione piuttosto debole, ma comunque altamente significativo ($p = 0,001$).

Vengono di seguito riportati i grafici a bolle delle suddette variabili abiotiche, rappresentati sul diagramma PCO dei campioni B (Fig. 5.19; 5.20; 5.21; 5.22).

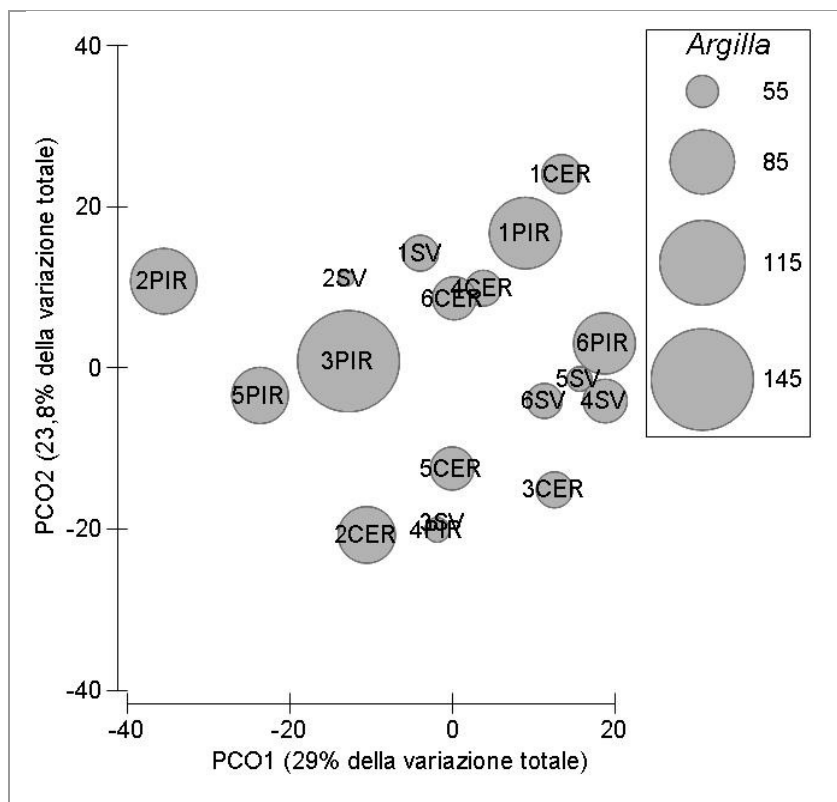


Fig. 5.19. Grafico a bolle della variabile contenuto di argilla, sovrapposto al diagramma PCO dei campioni B, rappresentati in base al fattore pedotipo e al fattore transetto, considerando le variabili biologiche esaminate.

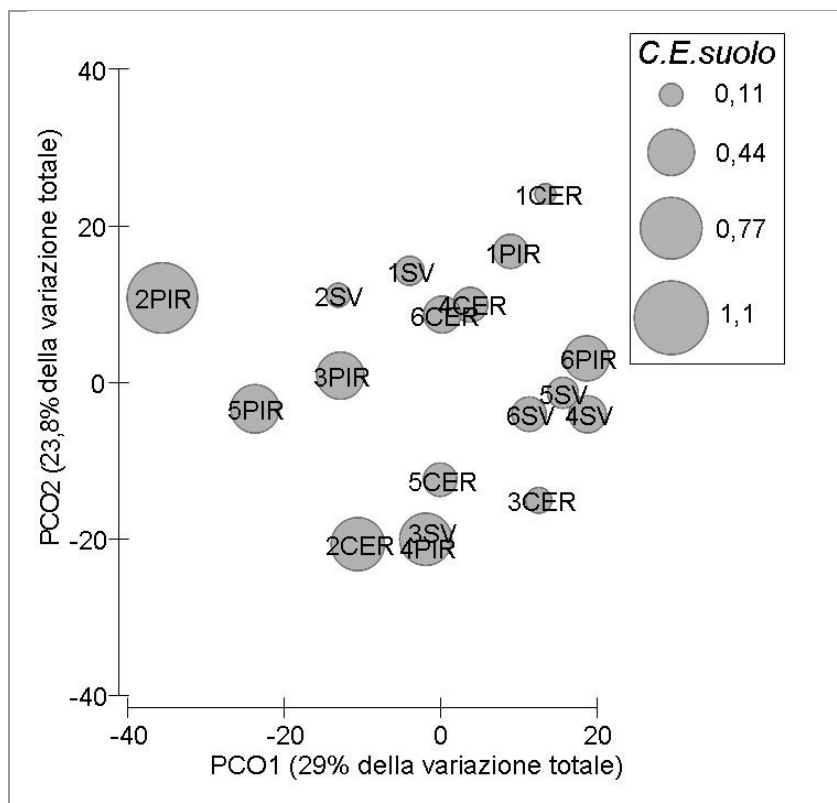


Fig. 5.20. Grafico a bolle della variabile CE, sovrapposto al diagramma PCO dei campioni B, rappresentati in base al fattore pedotipo e al fattore transetto, considerando le variabili biologiche esaminate.

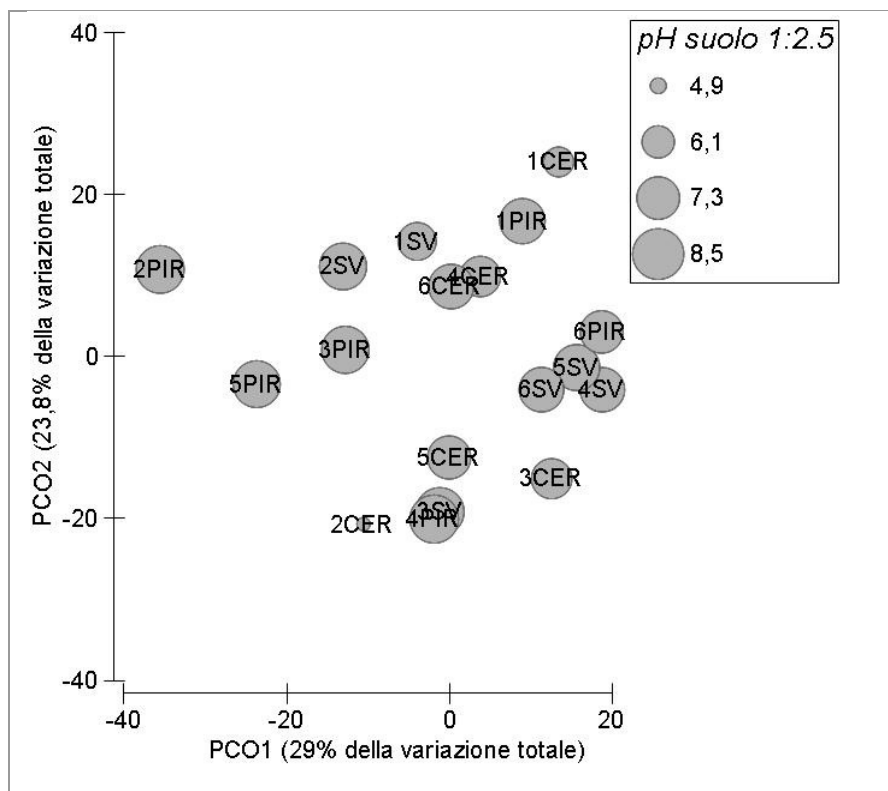


Fig. 5.21. Grafico a bolle della variabile pH, sovrapposto al diagramma PCO dei campioni B, rappresentati in base al fattore pedotipo e al fattore transetto, considerando le variabili biologiche esaminate.

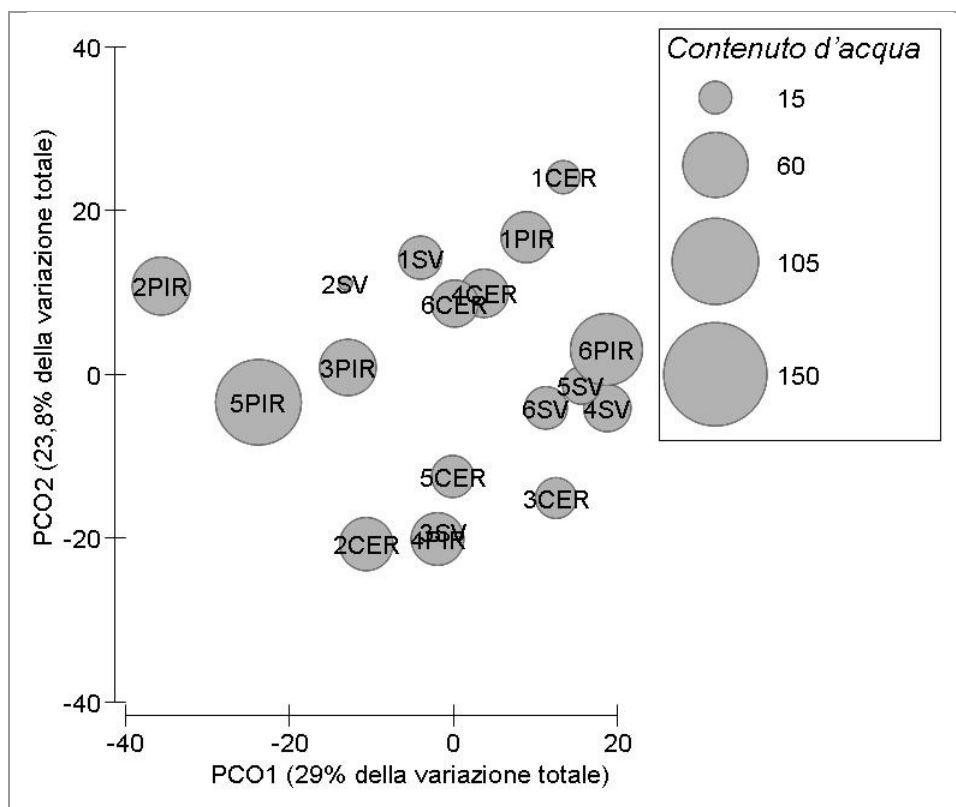


Fig. 5.22. Grafico a bolle della variabile contenuto d'acqua, sovrapposto al diagramma PCO dei campioni B, rappresentati in base al fattore pedotipo e al fattore transetto, considerando le variabili biologiche esaminate.

Come si può osservare dalle figure, la variabile abiotica che permette di evidenziare maggiormente la presenza di raggruppamenti distinti tra campioni è la CE. Infatti, in base a tale variabile, si vede bene la separazione dei campioni corrispondenti al pedotipo Pirottolo, che presentano un valore di CE in genere maggiore rispetto agli altri pedotipi. I primi tendono ad occupare la parte sinistra del diagramma, tranne il campione 1PIR (Fig. 5.20). Viceversa, la variabile abiotica che determina una situazione di maggiore omogeneità tra i campioni, non evidenziando dei raggruppamenti, è il pH (Fig. 5.21). Quest'ultimo aspetto può essere spiegato dal fatto che, in base ai risultati ottenuti dal BIOENV, tra tutte le combinazioni a tre variabili e rispetto ad altre combinazioni con un numero maggiore di variabili, la combinazione a tre variabili che presenta il coefficiente di correlazione più elevato non contiene il pH ma solo contenuto in argilla, CE e contenuto d'acqua. Allo stesso tempo, la differenza, in termini di coefficiente di correlazione, tra la combinazione a quattro variabili (CE, pH, contenuto di argilla e d'acqua) e quella a tre variabili, escluso il pH, è lieve, rispettivamente 0,668 e 0,639. Perciò, è verosimile che il pH incida in misura minore alla correlazione trovata considerando tutte e quattro le variabili.

5.4 Relazione tra le forme di humus e la struttura del popolamento

Per evidenziare eventuali relazioni esistenti tra le forme di humus definite per i siti dei campioni B e la struttura dei popolamenti, è stato realizzato il diagramma PCO considerando le variabili biologiche esaminate in relazione a tali campioni, rappresentati in base alle tipologie di humus.

Dall'esame di tale diagramma (Fig. 5.23), emerge la vicinanza tra i campioni corrispondenti al pedotipo San Vitale della zona est (4SV, 5SV, 6SV) e più in generale un raggruppamento più o meno evidente dei campioni dei pedotipi San Vitale e Cerba nella zona a destra del grafico. Tale disposizione ricalca la similarità tra le tipologie di humus per questi due pedotipi. Tuttavia, si osserva come il campione 1CER sia all'esterno di tale raggruppamento. La disposizione rispecchia la diversità nella tipologia di humus, definita per questo campione, rispetto a tutti i Cerba e San Vitale.

Riguardo ai campioni dei suoli Pirottolo, non si osserva una corrispondenza tra le tipologie di humus e la disposizione dei campioni nel diagramma.

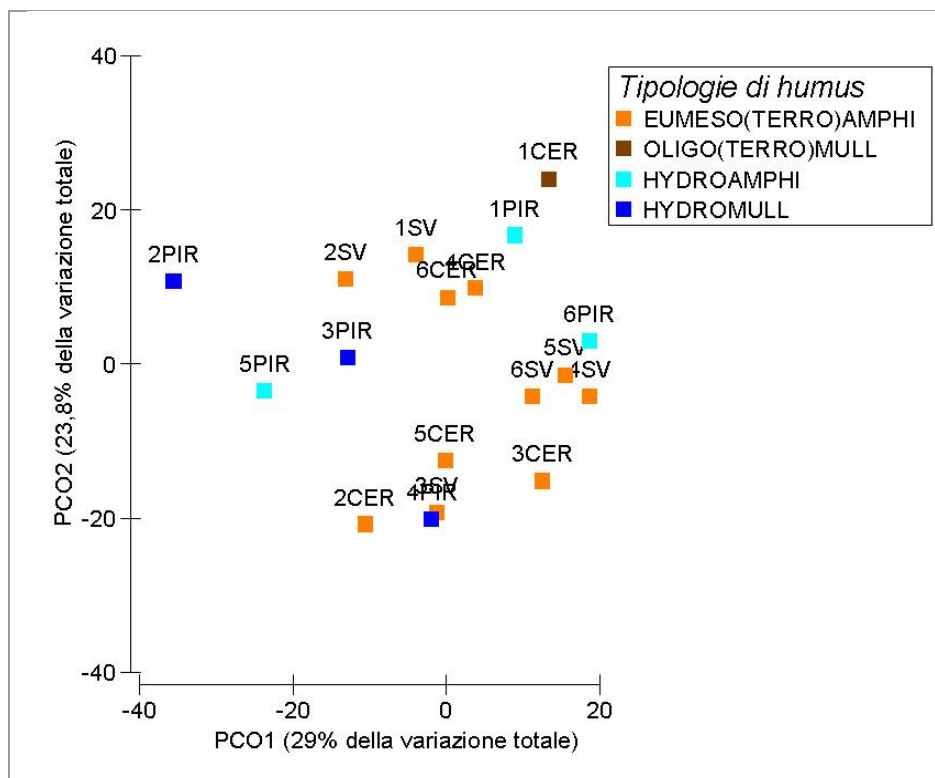


Fig. 5.23. Diagramma PCO dei campioni B, rappresentati in base alle tipologie di humus identificate, considerando le variabili biologiche esaminate. Per una migliore lettura del grafico sono state aggiunte le etichette identificative dei campioni, in base al numero del transetto e al pedotipo.

6. Discussione

L'unico studio pubblicato sulle caratteristiche del popolamento dei microartropodi della Pineta San Vitale è quello di Scossiroli (1974). Il confronto tra i risultati di questo studio, basato su campionamenti effettuati alla fine degli anni '60 e quelli presentati qui può essere compiuto solo ad un livello molto generale a causa delle rilevanti differenze, sia dal punto di vista degli obiettivi sia per il disegno sperimentale.

L'indagine di Scossiroli è incentrata sulla valutazione dell'influenza del complesso industriale sito nelle vicinanze della Pineta sul popolamento dei microartropodi. Questi organismi hanno quindi assunto il ruolo di evidenziare, attraverso variazioni qualitative e quantitative, eventuali effetti significativi dell'inquinamento atmosferico industriale attraverso un accumulo di composti chimici di disturbo nel suolo.

Considerando il fatto che all'epoca del suddetto studio poco si conosceva sui metodi ottimali di campionamento da adottare in un esame sistematico sulla pedofauna, il campionamento è avvenuto in due momenti: un'indagine preliminare, avvenuta nel periodo compreso tra il 15 febbraio e il 28 aprile 1968, ed il campionamento vero e proprio, realizzato nel periodo compreso tra il 5 giugno e il 25 novembre dello stesso anno.

Dal momento che il campionamento per l'indagine del presente studio è avvenuto nel periodo primaverile, risulta più utile attuare un confronto considerando i risultati dell'indagine preliminare condotta da Scossiroli ed in particolare, è utile considerare i risultati sulla composizione del popolamento relativi ai prelievi del 30 marzo e del 28 aprile, poiché le altre date considerate nello studio fanno riferimento al periodo invernale.

Un altro aspetto da tenere in considerazione riguarda i siti e la modalità di campionamento; nel nostro caso sono stati definiti sei transetti, con le relative stazioni di prelievo, e ogni campione consiste nell'unione di tre carote di suolo del volume di circa 424 cm^3 ciascuna. Viceversa, nello studio di Scossiroli, essendo appunto un'indagine preliminare, è stato esaminato un solo sito per ciascuna data, prelevando una carota di suolo del volume di circa 176 cm^3 per ogni campione. Il campionamento del 30 marzo è avvenuto nelle vicinanze dello Scolo Fossatone, nella zona centrale dell'area d'indagine, ed ha comportato la raccolta di 80 carote, il campionamento del 28 aprile è stato condotto nelle vicinanze del fiume Lamone, nella zona settentrionale dell'area indagata, e ha portato alla raccolta di 20 carote.

Dal confronto, come prevedibile, emerge che la componente biologica del suolo per entrambi gli studi, è dominata da acari e collemboli con abbondanze maggiori rispetto a tutti gli altri. Inoltre, anche le densità emerse dai due studi risultano paragonabili, attestandosi in media attorno alle decine/centinaia di migliaia di individui/m² per gli acari e alle centinaia/migliaia di individui/m² per i collemboli.

Sempre in linea con quanto riscontrato da Scossiroli, per questi due taxa, dal punto di vista quantitativo, è stata rilevata una maggiore variazione nella frequenza media degli acari rispetto ai collemboli.

Riguardo agli altri taxa, per entrambi gli studi, si osserva una generale situazione di minore presenza, accentuata nello studio di Scossiroli per proturi, coleotteri e ditteri.

Il primo quesito a cui si è cercato di rispondere con il presente studio riguarda le eventuali differenze legate alla natura dei pedotipi; in particolare ci si è chiesti se fosse possibile individuare un pattern di variazione generale lungo il gradiente che va dalle sommità dunali alle bassure interdunali. In linea generale, per quanto riguarda le caratteristiche abiotiche è possibile affermare che un tale pattern esiste, confermando quanto osservato da Buscaroli *et al.* (2007), pur con qualche differenza tra i diversi transetti.

In particolare, per quanto riguarda le caratteristiche chimiche e fisiche del suolo si osserva che i campioni Pirottolo si presentano piuttosto distinti dagli altri. Infatti, per tale pedotipo si osserva un tenore medio di salinità sensibilmente maggiore che non negli altri due, così come maggiore risulta il contenuto d'acqua. Tali caratteristiche possono essere spiegate dal fatto che i suoli Pirottolo sono presenti nelle zone depresse con falda superficiale da affiorante a semi-affiorante che, può presentarsi più o meno salmastra, come conseguenza legata al fenomeno dell'ingressione del cuneo salino. Inoltre, la stessa condizione di ristagno idrico per questo tipo di suoli può determinare un accumulo di sali nel suolo, come conseguenza del mancato allontanamento degli stessi dal sistema.

Allo stesso tempo, per i campioni di tale pedotipo, che presenta una tessitura che può essere di tipo sabbioso fine franca o franco sabbiosa fine, è stato determinato un contenuto maggiore della frazione argillosa, così come maggiori sono risultati il contenuto d'azoto (TKN) e il contenuto di carbonio organico (TOC).

Considerando poi le variazioni dei pedotipi nei transetti in relazione alle due zone considerate, si evidenzia come i pedotipi Cerba dei transetti appartenenti alla zona ovest presentino in media un valore di pH sempre inferiore a quello calcolato per gli altri due pedotipi (sebbene tale caratteristica sia meno evidente per il transetto 3).

Comunque, rimane il fatto che i suoli Cerba e San Vitale si presentino piuttosto simili tra loro rispetto ai suoli Pirottolo.

Tale raggruppamento trova conferma anche nell'indagine sui tipi di humus che li caratterizzano. Infatti, si osserva come la quasi totalità dei suoli Cerba e San Vitale presenti la stessa forma di humus denominata *Eumeso(terro)amphi*, mentre i suoli Pirottolo rientrano tutti nel gruppo Hydro, suddividendosi poi tra le forme *Hydroamphi* e *Hydromull*. Tuttavia, è importante ricordare come siano emerse alcune difficoltà oggettive dal punto di vista dell'utilizzazione della chiave tassonomica (Zanella *et al.*, 2011) che comunque, come già segnalato, si presenta come un “*work in progress*” nel quale alcune tipologie di humus devono essere ulteriormente studiate e probabilmente altre sono ancora sconosciute. Per quanto riguarda le variabili biologiche, risulta invece difficile individuare un pattern comune, anche se comunque è evidenziabile qualche similitudine.

Dall'esame del diagramma PCO dei centroidi delle stazioni (Fig. 5.11), si evidenzia come la maggior parte dei suoli Pirottolo siano distribuiti in un intervallo di valori piuttosto ristretto per quanto riguarda le coordinate lungo la PCO2, occupando la zona in alto nel diagramma. Fa eccezione la stazione 4PIR, che si trova invece in basso ed è caratterizzata da abbondanze relativamente elevate di diplopodi e proturi (al contrario gli altri suoli Pirottolo presentano basse abbondanze di diplopodi). La differenza osservata nella pedofauna di 4PIR rispetto agli altri campioni dello stesso pedotipo, coincide anche ad una diversa vegetazione, rappresentata in questa stazione, da *Phragmites australis*, non riscontrata nelle altre stazioni.

Sempre considerando lo stesso diagramma, appaiono caratterizzate da un popolamento molto simile tra loro, le tre stazioni San Vitale appartenenti alla zona est, in corrispondenza di elevati valori della PCO1 e valori intermedi della PCO2, una zona del diagramma che può esser associata alla presenza di un elevato numero di taxa e ad abbondanze elevate per la maggior parte di essi.

Al contrario, i San Vitale della zona ovest, sono lontani tra loro e lontani dai San Vitale est e nel complesso occupano una regione del piano di ordinamento che può essere associata a basse ricchezze in taxa e basse abbondanze, in particolare per i collemboli.

Le stazioni Cerba, ad eccezione della 2CER, sono abbastanza vicine alle stazioni San Vitale est, piuttosto concentrate lungo la PCO1 e hanno come carattere comune una abbondanza piuttosto elevata di collemboli, anche nel caso in cui altri taxa siano poco abbondanti.

Va sottolineato che le distanze di Bray-Curtis tra centroidi non superano in nessun caso il 41%, indicando che comunque non esistono grandi differenze di composizione nei popolamenti delle diverse stazioni. Questo sembra almeno in parte dovuto al fatto che il popolamento è stato descritto sulla base dei taxa di rango elevato (*phyla*, classi, ordini), utilizzati nel calcolo dell'indice QBS-ar, che contengono al loro interno numerose specie. In particolare, acari e collemboli sono presenti con abbondanze elevate in tutti i campioni. Probabilmente il risultato sarebbe stato diverso se si fosse descritto il popolamento sulla base delle singole specie o comunque utilizzando taxa di rango inferiore. Un approfondimento in questo senso è previsto ma non rientra nell'ambito del presente lavoro di tesi. Tuttavia, è importante anche osservare che l'area di studio è di dimensioni limitate e costituisce di fatto un continuum ambientale.

Considerando poi le classi di qualità del suolo, definite sulla base dei valori di QBS-ar ottenuti, si osserva l'assenza di differenze sistematiche tra i pedotipi. Tutti presentano in media un valore 6, corrispondente ad una qualità biologica piuttosto elevata. Il transetto 2 (zona ovest) sembra discostarsi dagli altri, presentando una qualità biologica più bassa rispetto agli altri in tutti i pedotipi. Questo trova una certa corrispondenza con il fatto che i punti che rappresentano questo transetto sono allineati nella parte più alta del diagramma PCO di Fig. 5.11.

Tuttavia, va sottolineato che tali valori devono essere considerati solo delle indicazioni di massima, poiché il metodo per definirle è ancora in fase di messa a punto (Parisi, 2001). Resta comunque il fatto che la Pineta risulta essere un ambiente semi-naturale, con una pressione antropica relativamente bassa, tale da permettere la definizione di una classe di qualità del suolo piuttosto elevata. Tale risultato è in linea con quelli di altri studi condotti in ambienti caratterizzati da un basso disturbo antropico, sebbene costituiti da biocenosi differenti, che hanno riportato classi di qualità comprese tra 5 e 7. Ad esempio, si riporta lo studio, svolto tra l'autunno 2003 e la primavera 2004, condotto dall'ARPA del Friuli Venezia Giulia, Dipartimento di Trieste (Miani *et al.*, 2004), che ha applicato il metodo del QBS-ar per un'indagine relativa a possibili effetti degli IPA. In particolare, tale studio ha riguardato la valle dell'Ospo (provincia di Trieste), comprendendo un'area che va dalle zone orientali, non sottoposte alla pressione antropica, a quelle occidentali, coincidenti ad un sito inquinato in seguito ad interrimento incontrollato di vari tipi di inquinanti. Sono state scelte 23 stazioni di campionamento distribuite dal confine al mare, in modo da indagare tutti gli ambienti presenti nell'area di studio. La qualità biologica del suolo è risultata eccellente in quasi tutta l'area. Considerando la divisione in classi, ben 16 stazioni

hanno raggiunto la classe 7 e la altre non sono scese sotto la 6. Anche in riferimento ai valori assoluti di QBS-ar, la maggior parte dei punti di campionamento ha raggiunto un punteggio superiore a 200. I dati ottenuti non hanno evidenziato differenze significative tra le stazioni poste in zone naturali e comunque a basso impatto antropico, e quelle situate all'interno o a ridosso del sito inquinato. Anche se può sembrare in contraddizione con quanto detto, nello stesso lavoro è evidenziato il fatto che, probabilmente, i contaminanti nell'area di studio siano stati in un qualche modo inibiti nella loro potenziale migrazione verso l'alto da legami di natura chimico-fisica con le particelle di terreno di riporto sovrastante che, una volta stabilizzato, costituisce una specie di "messa in sicurezza permanente" naturale.

Viceversa, studi condotti in ambienti più antropizzati hanno fatto emergere classi di qualità inferiori. Uno di questi è stato svolto dall'Università della Calabria, Dipartimento di Ecologia (Talarico *et al.*, 2005), su un agrumeto sito in Località "S. Giorgello", nel comune di Pizzo Calabro, che ha previsto due stazioni di campionamento adiacenti dello stesso agrumeto, arato ed inerbito, per verificare eventuali variazioni nella biodiversità dei due siti. Le classi di qualità del suolo risultanti sono rispettivamente pari a 3 (presenza di due gruppi euedafici e valore di indice QBS-ar pari a 65) e a 5 (presenza di tre gruppi euedafici e valore di indice QBS-ar pari a 132).

Il secondo aspetto indagato riguarda i possibili effetti della salinizzazione sulla composizione del popolamento di microartropodi del suolo.

Proprio per cercare di valutare questi effetti è stato introdotto il fattore zona nel disegno di campionamento. Deve però essere sottolineato che di per sé evidenziare un effetto di questo fattore non significa dimostrare un effetto della salinizzazione. Dal momento che la falda e il suolo soggetto a salinizzazione sono solo nella zona est, come evidenziato da Giambastiani (2006), non è infatti possibile disegnare un campionamento che separi la salinità da altre differenze che possono comunque esistere tra le due zone. Nell'attribuire, almeno ipoteticamente, un effetto eventualmente osservato alla salinizzazione, risulta quindi importante valutare anche altre variabili che potenzialmente possono influire sulla pedofauna. Risulterà inoltre importante valutare le differenze tra il campionamento primaverile, analizzato nel presente lavoro, e quello estivo dove ci si aspetta un aumento sensibile della salinità di suolo e falda.

Considerando le caratteristiche chimiche e fisiche del suolo, le due zone risultano sostanzialmente equivalenti. L'unica indicazione di una qualche differenza si ha dall'analisi compiuta su tutti i campioni sulla base di pH, CE e contenuto in acqua. La

distribuzione dei campioni delle due zone, nello spazio definito da queste variabili, infatti, non è completamente sovrapposta. La differenza sembra in gran parte attribuibile alla presenza nella zona ovest di alcuni campioni caratterizzati da un pH più basso. Inoltre, la maggior parte delle stazioni Cerba e S. Vitale della zona ovest ha valori di CE più bassi delle stazioni con gli stessi pedotipi della zona est, ma le stazioni Pirottolo hanno CE confrontabili nelle due zone. I valori massimi di CE raggiunti nei campioni ovest sono comparabili con quelli della zona est, e corrispondono ai campioni 2PIRB, classificato come suolo leggermente salino (CE pari a 1 dS/m), e 5PIRC, definito come suolo moderatamente salino (CE pari a 1,62 dS/m), sulla base della classificazione di Sbaraglia e Lucci (1994) e RER (1994).

Anche per quanto riguarda l'indagine condotta sulla tipologia di humus, non si osservano differenze sistematiche tra le due zone.

Dal punto di vista del popolamento di microartropodi, le due zone appaiono un po' più differenziate, sebbene non emergano delle differenze sistematiche tra le due zone nel gradiente che intercorre dal suolo Pirottolo al suolo San Vitale.

In particolare, collemboli e tisanotteri sono tra i taxa più importanti nel determinare le differenze tra zona est e zona ovest, presentandosi con abbondanze in genere maggiori nella prima zona.

Dal punto di vista delle classi di qualità del suolo è rilevata una certa differenza tra le due zone, con la zona ovest che presenta una qualità biologica media dei suoli un po' inferiore rispetto alla zona est, differenza comunque di scarsa entità.

Tale generale omogeneità può essere nuovamente spiegata considerando le limitate dimensioni dell'area di studio e la sua uniformità ambientale.

Un ultimo aspetto d'indagine nel presente lavoro di tesi riguarda i possibili effetti di alcune delle caratteristiche chimico-fisiche del suolo e della tipologia della lettiera sulla composizione del popolamento di microartropodi.

Dai risultati della procedura BIOENV si evidenzia solo una lieve correlazione delle struttura del popolamento con la CE, il contenuto in acqua, il pH ed il contenuto in argilla. Per quanto riguarda la CE e quindi la salinità, è importante notare che, avendo effettuato il campionamento nel periodo primaverile, la differenza stessa del grado di salinizzazione dei suoli a livello superficiale tra le due zone è minore che non in estate, come emerge dallo studio di Buscaroli e Zannoni (2010). Pertanto si può ipotizzare che anche le differenze biologiche associate alla CE potrebbero rivelarsi maggiori per il campionamento estivo.

Pur essendo stata rilevata una correlazione tra la struttura del popolamento ed una combinazione di alcune variabili abiotiche, non è possibile determinare le eventuali relazioni tra le variabili abiotiche a loro volta correlate con quelle biologiche. Ciò nonostante, considerando le cause che determinano la separazione osservata tra i suoli Pirottolo rispetto agli altri due pedotipi, si può ipotizzare che esista una relazione causa-effetto tra il contenuto di acqua e la salinità.

7. Conclusioni

Il presente studio conferma che le caratteristiche chimiche e fisiche dei suoli della Pineta S. Vitale variano secondo un modello comune lungo il gradiente compreso tra le sommità dunali e le bassure interdunali. In particolare, i suoli classificati come Pirottolo sulla base della loro posizione, sono sempre ben distinguibili rispetto ai suoli identificati come Cerba e San Vitale. Questi due pedotipi, invece, non sono chiaramente distinti tra loro.

Lo stesso vale anche per le caratteristiche dell'humus, definite sulla base del metodo di Zanella *et al.*, 2011, nonostante i problemi riscontrati nella sua applicazione.

Non è invece possibile individuare un pattern valido per tutti i transetti campionati a riguardo della struttura del popolamento di microartropodi, sebbene, almeno per Pirottolo e Cerba si riconoscano alcune caratteristiche che accomunano la maggior parte delle stazioni relative al medesimo pedotipo. Simili tra loro sono anche i popolamenti delle tre stazioni San Vitale della zona est.

Un elemento che evidenzia l'assenza di un modello comune di variazione tra pedotipi, si osserva per le stazioni San Vitale della zona ovest, le quali risultano piuttosto differenti tra loro e rispetto alle stazioni San Vitale est.

Per quanto riguarda i risultati dell'applicazione del metodo QBS-ar, i tre pedotipi risultano sostanzialmente equivalenti e alla maggior parte delle stazioni è assegnata una qualità del suolo elevata.

Confrontando tra di loro le due zone, non emergono differenze rilevanti dal punto di vista chimico e fisico. In particolare, i campioni PIR, quelli maggiormente in contatto con la falda freatica, hanno conduttività elettriche paragonabili nelle due zone e, in generale, sono classificabili come non salini (secondo la classificazione di Sbaraglia e Lucci, 1994 e RER, 1994). Questa situazione era in larga parte attesa per il periodo primaverile. Anche le tipologie di humus non evidenziano differenze sistematiche in base alla zona.

La distinzione tra le due zone appare leggermente più accentuata per quanto riguarda le caratteristiche del popolamento, in particolare l'abbondanza dei collemboli, maggiore per la zona est. La differenza è più evidente se si considerano le stazioni S. Vitale. Il transetto caratterizzato da una più bassa qualità secondo il metodo QBS è il transetto 2, appartenente alla zona ovest, che risulta distinto dagli altri anche sulla base dell'analisi multivariata. La correlazione tra caratteristiche chimiche e fisiche del suolo e struttura del popolamento, pur risultando statisticamente significativa, è abbastanza debole e quindi gran parte delle

differenze osservate tra i popolamenti delle diverse stazioni non sono spiegate sulla base delle variabili abiotiche misurate. La CE del suolo risulta essere una delle variabili correlate alle caratteristiche del popolamento, anche se questo di per sé non implica che la salinità abbia un effetto diretto sul popolamento stesso. Infatti molte delle caratteristiche del suolo misurate variano in modo strettamente correlato.

Non sembra comunque possibile individuare nella pedofauna uno stress dovuto alla salinizzazione dei suoli, sia considerando i valori di CE misurati, che non sono mai elevati, sia considerando il fatto che i campioni che presentano un numero inferiore di taxa e di individui sono presenti nella zona ovest.

Il presente studio ha permesso di caratterizzare il popolamento di microartropodi e documentare le differenze esistenti tra le stazioni in assenza di effetti associati alla salinizzazione e risulta un buon termine di confronto per poter evidenziare lo stress indotto da tale fenomeno durante il periodo estivo, oggetto di un campionamento successivo.

Bibliografia

Anderson M.J. (2001). A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology*.

Anderson M.J. Gorley R.N., Clarke K.R. (2008). PERMANOVA+ for PRIMER: Guide to Software and Statistical Methods. PRIMER-E Ltd, Plymouth, UK.

Antonellini M., Mollema P., Giambastiani B., Bishop K., Caruso L., Minchio A., Pellegrini L., Sabia M., Ulazzi E., Gabbianelli G. (2008). Salt water intrusion in the coastal aquifer of the southern Po Plain, Italy. *Hydrogeology Journal* 16: 1541–1556.

APAT (2002). Guida tecnica sui metodi di analisi per il suolo e i siti contaminati. Utilizzo di indicatori ecotossicologici e biologici.

APAT (2002). Proposed plan against beach erosion and environmental restoration of the Emilia-Romagna coast.

Arfelli D. (1975). Quando c'era la pineta. Edizioni del Girasole. Ravenna.

Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli (2003). Il territorio dell'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli, Regione Emilia-Romagna. Consultabile su: <http://www.regione.emilia-romagna.it/baciniromagnoli/studio1.htm>

Bassi A. (2002). Guida alla flora della pineta di San Vitale, vol. I, Longo Editore Ravenna.

Bassi A. (2004). Guida alla flora della pineta di San Vitale, vol. II, Longo Editore Ravenna.

Benassai E., Ragone A., Cavazza S., Buffoni E., Dal Cin R., Calderoni G., Simeoni U., Biagini E. (1979). Le spiagge di Romagna: uno spazio da proteggere, Quaderno n. 2, Lo Scarabeo, Bologna.

Bloem, E., Van Der Zee, S.E.A.T.M., Tóth, T. & Hagyó, A. (2008). Risk assessment methods of salinization. RAMSOIL Report 2.4. Available at: <http://www.ramsoil.eu> [accessed April 2010].

Bondesan M., Favero V., Viñals M.J. (1995). New evidence on the evolution of the Po delta coastal plain during the Holocene. *Quaternary international* Vol. 29/30, 105-110.

Bongers T. (1990). The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia*, 83: 14-19.

Borgia G., Brighenti G., Vitali D. (1982). La coltivazione dei pozzi metaniferi del bacino polesano e ferrarese. Esame critico della vicenda, Inarcos, Bologna.

Bray J.R., Curtis J.T. (1957). An ordination of the upland forest communities of Southern Wisconsin. *Ecological Monography*.

Buscaroli A., Pezzi G., Zannoni D. (2007). Suoli e vegetazione in una pineta litoranea. Un caso studio nella provincia di Ravenna. In “Suolo ambiente paesaggio”. Atti del Convegno Nazionale della Società Italiana della Scienza del Suolo. Imola, 27 - 30 giugno 2006, pp.119 – 126. Ed. Tipolitografia "F.G.".

Buscaroli A., Zannoni D. (2006). I suoli delle Pinete di Classe e San Vitale. In: CIRSA Eds. “Caratteristiche ambientali del sistema delle pinete storiche ravennati di San Vitale e Classe: aggiornamento al 2006”.

Buscaroli A., Zannoni D. (2010). Influence of ground water on soil salinity in the San Vitale Pinewood (Ravenna - Italy). *Agrochimica*, Vol. LIV – 5:303-320.

Cencini C., Cuccoli L., Fabbri P., Montanari F., Semboloni F., Torresani S., Varani L. (1979). Le spiagge di Romagna: uno spazio da proteggere, Quaderno n. 1, Lo Scarabeo, Bologna.

Cencini C., Piastra S. (2007). L'evoluzione del litorale ravennate tra processi naturali ed interventi antropici: una prospettiva geografica. In: Ferrari C., Bassi Angelini C. (eds), La selva antica di Ravenna a cento anni dalla legge Rava. Longo Editore, Ravenna.

Ciabatti M. (1966). Ricerche sull'evoluzione del Delta Padano. *Giornale di Geologia*, 34-2, pp. 381- 410.

Ciabatti M. (1990). Geomorfologia ed evoluzione del Delta Padano. In: Il mondo della natura in Emilia-Romagna. La pianura e la costa. Silvana, Cinisello Balsamo.

Ciabatti M., Veggiani A. (1990). Caratteri ed evoluzione del litorale emiliano-romagnolo. In: Il mondo della natura in Emilia-Romagna. La pianura e la costa. Silvana, Cinisello Balsamo.

Clarke K.R. & Warwick R.M. (2001). Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation. PRIMER-E Ltd, Plymouth, UK.

Codurri M., Truzzi A., Bertonazzi M.C. (2005). Microartropodi del terreno, manuale da campo per il riconoscimento dei microartropodi del terreno come indicatori della qualità biologica del suolo (metodo QBS-ar), Calvatone.

Coineau Y, Cléva R, Du Chatenet G. (1997). Ces animaux minuscules qui nous entourent, Etude (relié).

D'Avino L. (2002). Esposizione del metodo di Vittorio Parisi per la valutazione della Qualità Biologica del Suolo (QBS) e proposta di standardizzazione delle procedure. Museo di Storia Naturale, Dip. di Biologia Evolutiva e Funzionale, Università degli studi di Parma.

De Paz J.M., Visconti F., Zapata R., Sánchez J. (2004). Integration of two simple models in a geographical information system to evaluate salinization risk in irrigated land of the Valencian Community, Spain. *Soil Use and Management* 20, 3: 333–342.

Dokuchaev V.V. (1898). Toward the Question of a Reappraisal of the Soils of European and Asiatic Russia. With a Classification of Soils, Moscow.

European Environment Agency (1995). Soil, in: Europe's Environment: the Dobbris Assessment. Chapter 7.

Fabbri P. (ed.) (1987). Il porto di Ravenna, Ed. Analisi, Ravenna.

Fabbri P., Missiroli A. (1998). Le pinete ravennati. Storia di un bosco e di una città, Longo Editore, Ravenna.

Faith D.P., Minchin P.R., Belbin L. (1987). Compositional dissimilarity as a robust measure of ecological distance. *Vegetatio*, **69**: 57–68.

FAO, ISRIC, ISSS, 1998. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Report, No. 84. FAO, Rome.

FAO (2007). The state of food and agriculture.

Available at: <http://www.fao.org/docrep/010/a1200e/a1200e00.htm>.

Fetter C.W. (2001). Applied hydrogeology, 4th ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.

Fierotti G., Dazzi C. e Tusa D. (1999). Riflessi dell'irrigazione con acque saline sulla qualità dei suoli. Convegno POM (Programma Operativo Multiregionale) Progetto di ricerca e divulgazione "OTRIS" (Ottimizzazione dell'uso delle risorse idriche, convenzionali e non, in sistemi colturali sostenibili), Foggia.

Gambolati G., Teatini P. (1998). Numerical analysis of land subsidence due to natural compaction of the upper Adriatic Sea basin. In: Gambolati G. (ed.) CENAS, Coastal evolution of the upper Adriatic sea due to level sea rise and natural and anthropogenic land subsidence. Kluwer Academic Publishing, Water Science & Technology Library, 26: 103-131.

Giambastiani B. M. S. (2006). Evoluzione idrologica ed idrogeologica della Pineta di San Vitale (Ravenna). Tesi di Dottorato di Ricerca in Scienze Ambientali, XIX Ciclo, A/A 2006-2007, Università di Bologna.

Giordano A. (1999). Pedologia. Utet, Torino.

Gower J.C. (1966). Some distance properties of latent root and vector methods used in multivariate analysis. *Biometrika*. 53: 325 – 338.

Gower J.C. (1992). Euclidean distance geometry. *Math. Scientist* 7: 1 – 14.

Guizzetti G. (1741). Ragguaglio storico della diversione dei duo fiumi il Ronco e il Montone dalla città di Ravenna, Bologna.

Huber S., Prokop G., Arrouays D., Banko G., Bispo A., Jones R.J.A., Kibblewhite M.G., Lexer W., Möller A., Rickson R.J., Shishkov T., Stephens M., Toth G., Van den Akker J.J.H., Varallyay G., Verheijen F.G.A., Jones A.R. (eds.) (2008). Environmental Assessment of Soil for Monitoring. Vol. I Indicators and Criteria. EUR 23490 EN/1. Office for the Official Publication of the European Communities, Luxembourg.

ISO 11269, parte I (1993). Metodo per la misura di inibizione della crescita delle radici.

Jacomini C., Nappi P., Sbrilli G., Mancini L. (2000). Indicatori e indici ecotossicologici e biologici applicati al suolo. ANPA, Roma. RTI CTN_SSC 3/2000.

Jenny H. (1941). Factors of Soil Formation. McGraw-Hill, New York.

Jones A. (lead author) (European Commission JRC); Barcelo S., Bouraoui F., Bosco C., Dewitte O., Gardi C., Hervás J., Hiederer R., Jeffery S., Montanarella L., Panagos P., Penizek V., Tóth G., Van Den Eeckhaut M., Liedekerke M.V., Verheijen F. (European Commission DG JRC); Marmo L., Olazábal C., Strassburger T., Viestova E. (DG ENV); Erhard M., Iversen C., Lükewille A., Petersen J.-E. (EEA contributors) (2010). The European Environment State and Outlook 2010. Soil. European Environment Agency, Kongens Nytorv 61050, Copenhagen, Denmark.

Latella L., Gobbi M. (2008). La fauna del suolo: tassonomia, ecologia e metodi di studio dei principali gruppi di invertebrati terrestri italiani, Museo Tridentino Scienze Naturali.

Lavelle P. (1997). Faunal activities and soil processes: adaptive strategies that determine ecosystem function. *Advances in Ecological Research*, 27: 93-132.

Legendre P. & Legendre L. (1998 c). Numerical ecology, 2 english ed., Elsevier, Amsterdam.

Maffiotti A. & Bona F. (1997). Introduzione all'ecotossicologia. In: Bona F., Maffiotti A. e Volterra L. (eds). *Analisi e recupero dei sedimenti marini. Quaderni di tecniche di protezione ambientale*. Pitagora Editrice Bologna.

McInnis R. (1995). Nematode Toxicity Assay using *Panagrellus redivivus*. National Water Research Institute. Burlington, Canada.

Menta C. (2008). Guida alla conoscenza della biologia e dell'ecologia del suolo. Funzionalità, diversità biologica, indicatori, Perdisa, Oasi Alberto.

Miani N., Skert N., Grahonja R. (2004). Biomonitoraggio sperimentale del suolo tramite il metodo della Qualità Biologica del Suolo (QBS) e coleotteri terrestri quali bioaccumulatori di Ipa. Convenzione per il Biomonitoraggio stipulata tra ARPA FVG e Provincia di Trieste. Campagna di rilevamento 2004.

Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-being. Synthesis. Island Press, Washington D.C.

MiPAF, Osservatorio Nazionale Pedologico per la Qualità del suolo, 2000. Metodi di Analisi Chimica del Suolo. Collana di metodi analitici per l'agricoltura diretta da Paolo Sequi. Franco Angeli Ed.

Nardi S. (1987). Le bonifiche nel secolo XIX e la Cassa di colmata del Lamone. In: *Costruire un territorio - Cartografia e fotografia delle bonifiche ravennati*. Longo Editore, Ravenna.

Parisi V. (2001). The Biological Quality of soil. A Method Based on Microarthropods. *Acta Naturalia de «L'Ateneo Parmense»*, 37, nn. 3/4: 105-114.

Pellegrini M., Tellini C. (2000). L'origine della pianura padana. In: Ferrari C., Gambi L. (eds), *Un Po di terra*, Diabasis, Città di Castello.

Piccoli F., Corticelli S., Merloni N. (1999). Carta della vegetazione del Parco Regionale del Delta del Po. Stazione Pineta di San Vitale e Piallasse di Ravenna in scala 1:25000. Selca, Firenze.

Pokarzhevskii A.D. (1996). The problem of scale in bioindication of soil contamination. In: Van Straalen N.M. & Krivolutsky D.A. (Eds), *Bioindicator Systems for Soil Pollution*, Kluwer Academic Publishers, NL.

Preti M., 2000. Eustatismo, subsidenza e linee di intervento per la difesa del territorio costiero in Emilia-Romagna. Mare e cambiamenti globali, ICRAM, ARPA – Ingegneria Ambientale, Bologna.

Regione Emilia-Romagna (1994). I suoli dell'Emilia-Romagna. Note illustrative. Servizio cartografico, Ufficio pedologico. Grafiche Zanini. Bologna.

Regione Emilia-Romagna (1999). Note illustrative Carta Geologica d'Italia. Scala 1:50000. Ravenna. Amorosi A. (ed.), Ist. Poligrafico e Zecca dello Stato Ed., Roma.

Ricci Lucchi F., Ciabatti M., Pellegrini M., Veggiani A. (1990). Evoluzione geologica della pianura. In: *Il mondo della natura in Emilia-Romagna. La pianura e la costa*. Silvana, Cinisello Balsamo.

Roncuzzi A. (1994). Storia idrogeologica della piallassa Baiona. In: Soprani S. & Ricci C. *Analisi dello stato ambientale e sanitario nelle valli ravennati. La Piallassa Baiona*. Azienda U.S.L. Dipartimento dei Servizi di Prevenzione, Ravenna.

Sbaraglia M., Lucci E. (1994). Guida all'interpretazione delle analisi del terreno ed alla fertilizzazione. Studio Pedon, Pomezia, Roma.

Scossiroli R.E. (1974). Influenza di insediamenti industriali sul circostante ambiente naturale. Studio sulla Pineta di San Vitale di Ravenna. Editrice Compositori, Bologna.

SoCo Project Team (2009). Louwagie G., Gay S.H., Burrell A. (eds) Addressing soil degradation in EU agriculture: relevant processes, practices and policies. Report on the project 'Sustainable Agriculture and Soil Conservation (SoCo)'. EUR 23767 EN – 2009.

Soil Survey Division Staff (1993). Soil survey manual. Soil Conservation Service. Handbook 18. U.S. Department of Agriculture.

Soil Survey Staff (2003). Keys to Soil Taxonomy, 9th ed., USDA - NRCS, Washington D.C.

Soil Survey Staff. (2006). Keys to Soil Taxonomy, 10th ed., USDA- NRCS, Washington, D.C.

Talarico F., Romeo M., Mazzei A., Brandmayr T.Z., Brandmayr P. (2005). Valutazione della qualità biologica del suolo (QBS) in un agrumeto della provincia di Vibo Valentia. Dipartimento di Ecologia, Università della Calabria, 87036 Arcavacata di Rende (CS), Italia. SItE.

Teatini P., Ferronato M., Gambolati G., Bretoni W., Gonnella M. (2005). A century of land subsidence in Ravenna, Italy. *Environ. Geol.*, 47: 831-846.

Todd D.K. (1953). Sea water intrusion in coastal aquifers. *Am. Geophys Union Trans.* 34:749–754.

UNI EN (1993). Qualità dell'acqua. Prova di inibizione della crescita di alghe di acqua dolce con *Scenedesmus subspicatus* e *Selenastrum capricornutum*. UNI EN 28692.

USDA (1954). Saline and alkaly soils. Agriculture handbook n. 60. United States Salinity Laboratory Staff. US Government Printing Office. Washington. USA.

Van-Camp L., Bujarrabal B., Gentile A.R., Jones R.J.A., Montanarella L., Olazabal C., Selvaradjou S.K. (2004). Reports of the technical Working Groups established under the

thematic strategy for soil protection. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. EUR 21319 EN/3.

Várallyay G. (2006). Salinisation/Sodification and Soil Compaction. 4th JRC International School on Soil Survey, Ispra, Varese, Italy, 28 August 2006. Research Institute for Soil Science and Agricultural Chemistry (RISSAC) of the Hungarian Academy of Sciences, Budapest, Hungary.

Veggiani A. (1974). Le ultime vicende geologiche del Ravennate. In: Scossiroli R.E. (ed.), *Influenza di insediamenti industriali sul circostante ambiente naturale. Studio sulla Pineta di San Vitale di Ravenna*. Editrice Compositori, Bologna.

Zanella A., Jabiol B., Ponge J.F., Sartori G., De Waal R., Van Delft B., Graefe U., Cools N., Katzensteiner K., Hager H., Englisch M., Brethes A., Broll G., Gobat J.M., Brun J.J., Milbert G., Kolb E., Wolf U., Frizzera L., Galvan P., Kolli R., Baritz R., Kemmers R., Vacca A., Serra G., Banas D., Garlato A., Chersich S., Klimo E., Langohr R. (2011). European Humus Forms Reference Base. hal-00541496, version 2 (01/02/2011). Disponibile in rete al sito: http://hal.archivesouvertes.fr/docs/00/56/17/95/PDF/Humus_Forms_ERB_31_01_2011.pdf

Zangheri P. (1936). *Flora e vegetazione delle Pinete di Ravenna e dei territori limitrofi fra queste e il mare*, Tip. Valbonesi, Forlì.